

SÉRIE A
N° D'ORDRE

26

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR
(Sciences Physiques)

PAR

ALBERT MILHOUD

**1^{re} THÈSE. — RECHERCHES SUR LA FORCE
ÉLECTROMOTRICE PRODUITE PAR L'ÉCOU-
LEMENT DE LA VAPEUR D'EAU.**

**2^e THÈSE. — L'HYDROGÈNE LOURD; L'EAU
LOURDE.**

Soutenues le

17 JUIL

1935 devant la Commission d'Examen.

JURY	{	MM. BEGHIN	{	Président.
		DARMOIS		Examineurs.
		CROZE		

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR
(Sciences Physiques)

PAR

ALBERT MILHOUD

**1^{re} THÈSE. — RECHERCHES SUR LA FORCE
ÉLECTROMOTRICE PRODUITE PAR L'ÉCOU-
LEMENT DE LA VAPEUR D'EAU.**

**2^e THÈSE. — L'HYDROGÈNE LOURD; L'EAU
LOURDE.**

Soutenues le

1935 devant la Commission d'Examen.

JURY	{	MM. BEGHIN	{	<i>Président.</i>
		DARMOIS		<i>Examineurs.</i>
		CROZE		

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen honoraire M. Molliard.

Doyen C. Maurain, professeur. — Physique du Globe.

Professeurs honoraires	H. le Chatelier.	Léon Brillouin.	Auger.
	H. Lebesgue.	Goursat.	Blaise.
	A. Fernbach.	Wallerant.	Dangeard.
	A. Leduc.	Guillet.	Janet.
	Emile Picard.	Péchar.	Lespiau.
	Rémy Perrier.	Freundler.	Marchis.

PROFESSEURS

G. Bertrand . . .	T Chimie biologique.	A. Dufour . . .	T Physique (P.C.B.)
M. Caullery . . .	T Zoologie (Évolution des Êtres oganisés.	L. Dunoyer . . .	Optique appliquée.
G. Urbain	T Chimie générale.	A Guillaiermond	T Botanique. (P.C.B.)
Emile Borel . . .	T Calcul des Probabilités et Physique mathématique.	M. Javillier . . .	Chimie Biologique.
Jean Perrin . . .	T Chimie physique.	L. Joleaud . . .	Paléontologie.
H. Abraham . . .	T Physique.	Robert Lévy . .	Zoologie.
E. Cartan	T Géométrie supérieure.	F. Picard	Zoologie. (Evolution des êtres organisés),
M. Molliard . . .	T Physiologie végétale.	Henri Villat . .	T Mécanique des fluides e applications.
L. Lapicque . . .	T Physiologie générale.	Ch. Jacob	T Géologie.
E. Vessiot	T Mécanique Analytique et Mécanique céleste.	P. Pascal	T Chimie minérale.
A. Cotton	T Recherches physiques.	M. Fréchet . . .	T Calcul des Probabilités e Physique mathématique.
J. Drach	T Analyse supérieure et Al- gèbre supérieure.	E. Esclangon . .	T Astronomie.
Charles Fabry . .	T Enseignement de Physique.	M ^{me} Ramart- Lucas	T Chimie organique.
Charles Pérez . .	T Zoologie.	H. Béghin	T Mécanique physique et expé rimentale.
Léon Bertrand . .	T Géologie structurale et géo- logie appliquée.	Foch	Mécanique expérimentale de fluides.
P. Portier	T Physiologie comparée.	Pauthenier . . .	Physique (P.C.B.)
E. Rabaud	T Biologie expérimentale.	De Broglie . . .	T Théories physiques.
M. Guichard . . .	Chimie minérale.	Chrétien	Optique appliquée.
Paul Montel . . .	T Théorie des fonctions et Théorie des transforma- tions.	P. Job	Chimie générale.
P. Wintrebert . .	T Anatomie et histologie com- parées.	Labrouste	Physique du globe.
L. Blaringhem . .	T Botanique.	Prenant	Zoologie.
O. Dubosq	T Biologie maritime.	Villey	Mécanique physique et ex périmentale.
G. Julia	T Application de l'analyse à la Géométrie.	Bohn	Zoologie (P.C.B.)
C. Mauguin . . .	T Minéralogie.	Combes	Botanique.
A. Michel-Lévy . .	Pétrographie.	Garnier	Calcul différentiel.
H. Bénard	T Mécanique expérimentale des fluides.	Pérès	Mécanique des fluides.
A. Denjoy	T Calcul différentiel et calcul intégral.	Hackspill	Chimie (P.C.B.)
L. Lutaud	T Géographie physique et géo- logie dynamique.	Laugier	Physiologie générale.
Eugène Bloch . .	T Physique théorique et phy- sique céleste.	Toussaint	Technique aéronautique.
G. Bruhat	Physique.	M. Curie	Physique (P.C.B.)
E. Darmois	Physique.	G. Ribaud	T Hautes températures.
A. Debierne . . .	T Radioactivité.	Chazy	T Mécanique rationnelle.
		Gault	Chimie (P.C.B.)
		Croze	Physique.
		Dupont	T Théories chimiques.
		Laquaine	Géologie.
		Valiron	Mathématiques générales.

Secrétaire A. Pacaud

Secrétaire honoraire D. Thombeck



RECHERCHES
SUR
LA FORCE ÉLECTROMOTRICE
PRODUITE PAR
L'ÉCOULEMENT DE LA VAPEUR D'EAU

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction</i>	7
---------------------------	---

CHAPITRE I

Mesure de la force électromotrice :

La vapeur s'écoule dans des tubes de faibles diamètres	11
La vapeur s'écoule dans des tuyères	16
Etat électrique de l'atmosphère où se fait l'écoulement	22
Répartition des potentiels	24
Influence du liquide entraîné par la vapeur	25
Remarque sur l'écoulement des fluides autres que la vapeur d'eau	29

CHAPITRE II

Différents facteurs intervenant dans la production de la force électromotrice :

Particularités de l'écoulement de la vapeur d'eau dans un tube présentant une section étranglée	31
Rôle de la tension superficielle	39
Remarque sur le sens de la force électromotrice	41
Valeur de la force électromotrice	44

CHAPITRE III

<i>Fonctionnement caractéristique d'un tube dans lequel on fait le vide et où s'échappe la vapeur d'eau</i>	52
---	----

CHAPITRE IV

<i>Interprétation thermodynamique des résultats expérimentaux</i> .	62
---	----

INTRODUCTION

Il y a près de cent ans. — Dans une lettre qu'Armstrong adressait à l'illustre Faraday en 1840, il rapportait le fait suivant ⁽¹⁾ « A sept mille nord-est de Newcastle-s/Tyne il y a une machine à vapeur à haute pression. La chaudière a une soupape de sûreté placée au-dessus d'un court cylindre terminé à chaque extrémité par un anneau plat; l'anneau inférieur est boulonné sur la chaudière. Pour en rendre le contact étanche, on y a interposé un enduit étouffé formé de litharge et d'huile de lin. Vers la fin du mois de septembre, il se fit une fissure, dans l'épaisseur de l'enduit, au travers de laquelle la vapeur s'échappa. Le mécanicien Patterson touchant d'une main le levier de la soupape, tandis que son autre main recevait le jet de vapeur, sentit des picotements particuliers dont il voulut se rendre compte. Observant tout ce qui se passait à chacun de ses mouvements, il vit que lorsqu'il approchait doucement le doigt du levier de la soupape, pendant que l'autre main recevait le jet de vapeur, il en sortait une étincelle. Cette observation fut faite vingt fois de suite et par de nombreux témoins. Cet effet se produisait quel que fût le point de la chaudière qu'on touchât du doigt si, en même temps, on recevait le jet de vapeur sur une autre partie du corps. »

La nouvelle de ce fait fut bientôt répandue et plusieurs personnes répétèrent l'expérience primitive, puis en firent d'autres avec des instruments propres à manifester la tension électrique.

Dans d'autres lettres publiées dans le *Philosophical Magazine* du mois de novembre de la même année, Armstrong précisa les conditions dans lesquelles avaient été faites ces observations.

Faraday se livra en 1842 ⁽²⁾ à toute une série d'expériences dont il tira la conclusion que l'évaporation n'était pas la cause du dégagement de

(1) *Ann. de Chim. et Phys.*, 2^e série, t. 75, 1840,, p. 328.

(2) *Ann. de Chim. et Phys.* 3^e série, t. 10, 1844, p. 88.

l'électricité, mais qu'il fallait l'attribuer au frottement. Il croyait aussi que des gaz purs sans mélange de particules solides ou liquides, étaient incapables de produire de l'électricité en frottant contre des substances solides ou liquides.

Armstrong qui construisit en 1843 sa machine hydro-électrique avec laquelle il obtint un courant capable d'une décomposition électrochimique de l'eau, n'accepta pas sans réserve les conclusions de Faraday. Ces dernières n'expliquent pas, en effet, pourquoi certaines formes d'orifices, par où s'écoule la vapeur, ne sont pas aussi efficaces qu'un simple conduit cylindrique dans lequel le frottement est certainement moindre.

Les traductions des lettres et mémoires d'Armstrong et de Faraday ont été presque totalement publiées dans les *Annales de Chimie et de Physique* de l'époque. En dehors d'un extrait d'une lettre d'Armstrong, écrite en 1840, que j'ai cité ci-dessus, et qui est intitulé « Sur le développement de l'électricité dans le jet de vapeur d'une chaudière », on trouve un nouvel extrait sur des expériences faites ensuite par le même physicien (1), et une « Description de la machine hydro-électrique construite pour l'Institut polytechnique et de quelques expériences faites avec cette machine ». (Extrait d'une lettre à M. Faraday de M. W.G. Armstrong) (2).

*
* *

Depuis cette époque, on ne retrouve aucune autre étude sur cette question qui semble avoir été complètement abandonnée pendant près d'un siècle, tous les efforts s'étant portés sur l'étude de l'induction électromagnétique, découverte par Faraday lui-même, et qui est à la base de la conception des machines électriques modernes.

Le point de départ de mes recherches est une observation tout à fait fortuite que j'ai faite lors des essais d'une machine à vapeur, dans une usine de la région parisienne au mois de mars 1932. Un tube de manomètre s'étant cassé, une fuite de vapeur se produisit par une fissure étroite et, à la grande surprise des personnes présentes, on était

(1) Ann. de Chim. et Phys. 3^e série, t. 7, 1843, p. 401.

(2) Ann. de Chim. et Phys. 3^e série, t. 10, 1844, p. 105.

très désagréablement secoué quand on approchait une main du jet, l'autre touchant le tube du manomètre.

Je n'eus pas à ce moment la possibilité de pousser plus loin mes observations mais j'y songeais souvent. Comme il m'avait semblé que la vapeur avait été électrisée par son passage dans un tube étroit, je comparais cette électrisation à celle qui se produit par l'écoulement d'un liquide sous pression dans un tube capillaire. On sait qu'il existe entre les deux extrémités du tube, si ce dernier est en matière isolante, une différence de potentiel qui est proportionnelle à la différence de pression qui produit l'écoulement. Cette différence de potentiel, dite de filtration, atteint des valeurs appréciables : la filtration de l'eau à travers une cloison poreuse sous une pression d'un atmosphère, par exemple, produit une force électromotrice de plus de 6 volts.

D'après cette première idée, j'avais conçu une machine qui était constituée essentiellement par une centaine de tubes de 0,5 mm. de diamètre intérieur, accolés les uns aux autres et jointoyés entre eux. Ce faisceau de tubes était monté entre deux flasques en cuivre dans une enceinte calorifugée. Une canalisation amenant la vapeur sous pression à l'une des extrémités du faisceau, l'écoulement devait produire une différence de potentiel entre les deux flasques et un débit proportionnel au nombre de tubes.

Avant de réaliser une telle machine, j'ai voulu me rendre compte de ce qui se passait dans l'écoulement de la vapeur dans un seul de ces tubes et c'est l'origine de mes premières expériences.

Je n'ai eu connaissance des expériences d'Armstrong et de Faraday, dont j'ai parlé ci-dessus qu'après mes essais de tuyères.

*
* *

J'ai fait une série d'expériences au Laboratoire de Mécanique Physique et Expérimentale de la Faculté des Sciences dont l'éminent Directeur M. Béghin a bien voulu mettre à ma disposition une salle de travail, du matériel et un personnel d'élite.

J'ai pu, grâce à l'obligeante hospitalité des Papeteries de Ballancourt, pousser les essais à une pression plus élevée que celle atteinte au Laboratoire et avec échappement de la vapeur dans le vide d'un condenseur industriel.

J'adresse à M. Béghin l'expression de ma plus vive reconnaissance. Je remercie également M. Fabry, membre de l'Académie des Sciences,

qui a bien voulu s'intéresser à mes travaux, et M. Darmois, professeur à la Faculté, pour ses obligeants conseils et l'intérêt avec lequel il a suivi mes efforts.

*
* *

J'ai divisé l'exposé de mes recherches en quatre chapitres.

Le premier chapitre comprend la description des principales expériences avec la mesure de la force électromotrice.

Dans le deuxième chapitre j'examine les différents facteurs qui peuvent intervenir dans la production de la force électromotrice.

Dans le troisième j'étudie plus spécialement le fonctionnement caractéristique d'un tube où s'échappe la vapeur et dans lequel on fait le vide.

Enfin, dans le quatrième, j'essaye une interprétation thermodynamique des résultats expérimentaux.

CHAPITRE I

Mesure de la force électromotrice produite

1° La vapeur s'écoule dans des tubes de faibles diamètres.

Mes premières expériences ont consisté à faire passer de la vapeur dans des tubes en verre très fins de divers diamètres et différentes longueurs et à mesurer la différence de potentiel entre les deux extrémités.

L'installation (fig. 1) comprenait une petite chaudière en tôle d'acier d'une vingtaine de litres, pouvant supporter une pression maximum de 10 kg./cm^2 . Elle était munie d'un manomètre métallique, d'un niveau d'eau, d'une soupape de sûreté et d'une prise de thermomètre. Sur la partie supérieure était branché un tube de fer de 15 mm. de diamètre intérieur, avec un robinet, en bout duquel se montait le tube en verre soumis aux essais au moyen d'un raccord spécial. La chaudière était chauffée par un bec de gaz à fort débit.

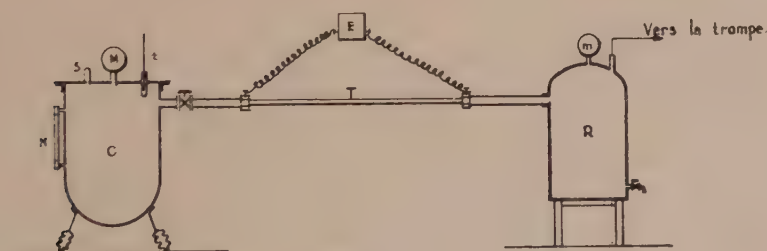


fig. 1.

L'autre extrémité du tube en verre communiquait avec un réservoir, également muni d'un manomètre, dans lequel on faisait le vide au moyen d'une trompe à eau, vide pouvant atteindre environ $0,300 \text{ kg./cm}^2$.

J'ai opéré avec des tubes en verre de 0,5 mm. et de 1,5 mm. de diamètre intérieur, le diamètre extérieur était de 10 mm. et la paroi

épaisse permettait de l'éprouver à de fortes pressions. La longueur était d'abord d'un mètre. J'ai essayé ensuite des longueurs de 0,5 m. et de 0,2 m.

Le tube en essai était soigneusement calorifugé, ainsi d'ailleurs que la chaudière et le tuyau d'amenée de vapeur. Le réservoir à vide était refroidi par un courant d'eau.

La chaudière était isolée sur trois pieds en porcelaine, les deux extrémités du tube étaient reliées à un électromètre E, au moyen de fils conducteurs; l'extrémité communiquant avec le réservoir à vide pouvait être mise à la terre.

L'appareil de mesure dont je me suis servi était un électromètre à quadrants filiformes Villey-Bouty qui permet de comparer des différences de potentiel.

J'ai fait une série d'expériences en employant l'électromètre suivant les deux modes classiques de montage, hétérostatique et idiostatique.

Je reproduis ci-contre (fig. 2) les courbes représentant les résultats obtenus. J'ai choisi parmi de nombreux essais, ceux qui m'ont paru les plus caractéristiques et que je pense ne pas être entachés d'erreurs accidentelles trop fortes.

Les principales difficultés que j'ai rencontrées pour les mesures, provenaient de la variation de la pression, et surtout de l'instabilité de l'écoulement de la vapeur pour les raisons que j'indiquerai ci-après.

P_e est la pression effective que je lisais sur le manomètre de la chaudière.

$P_{abs.} = P_e + 1 \text{ kg./cm}$ (approximation suffisante).

p est la pression lue au manomètre monté sur le réservoir à vide. Il est gradué en cm. de mercure que je transforme en kg./cm^2 .

$(P - p)$ est la différence de pression, aux deux extrémités du tube, qui produit l'écoulement.

Δ est la déviation en millimètres du spot lumineux sur la règle horizontale sur laquelle apparaît le rayon réfléchi par le miroir fixé à l'aiguille de l'électromètre. C'est l'élongation maximum que je note à chaque relevé.

Pour les mesures idiostatiques pour lesquelles cette déviation est proportionnelle au carré du potentiel, je calcule $\sqrt{\Delta} \times 10$ qui est proportionnel au potentiel, pour avoir des courbes comparables.

Je maintenais le vide aussi constant que possible et je faisais varier P.

Les droites 1, 2, concernent le même tube de 0,5 mm. de diamètre et de 1 mètre de longueur, la droite 1 a été relevée en mesure hétérostatique, elle représente les variations de Δ et par conséquent de la force électromotrice en fonction de $(P - p)$; la droite 2 a été relevée en montage idiostatique, elle représente la variation de $\sqrt{\Delta} \times 10$. Les droites se rencontrent sensiblement sur l'ordonnée des pressions, la valeur de la chute de pression minimum étant d'environ 0,700 kg./cm². La droite 3 concerne un tube de 1 mm. 5 de diamètre, elle a été relevée en montage idiostatique et représente encore les variations de $\sqrt{\Delta} \times 10$ en fonction de la chute de pression.

VARIATION DE LA FORCE ELECTROMOTRICE EN FONCTION DE LA DIFFÉRENCE DE PRESSION

1) Tube de verre. - Diamètre 0,5 mm., longueur 1 m.

Mesures hétérostatiques.

P_e en k/g cm ²	P. abs en k/g cm ²	P en k/g cm ²	$P-p$ en k/g cm ²	Δ en m/m.
0,600	1,600	0,340	1,260	20
0,900	1,900	»	1,560	28
1,200	2,200	»	1,860	36
1,500	2,500	»	2,160	50
1,800	2,800	»	2,460	58
2	3	»	2,660	60
2,200	3,200	»	2,860	66
2,400	3,400	»	3,060	70
2,700	3,700	»	3,360	80
3	4	»	3,660	90
3,200	4,200	»	3,860	97
3,500	4,500	»	4,160	105
3,800	4,800	»	4,460	115
4	5	»	4,660	120
4,200	5,200	0,370	4,830	128
4,400	5,400	»	5,030	132
4,600	5,600	»	5,230	137
4,750	5,750	»	5,380	140

2) Même tube que précédemment.

Mesures idiostatiques

P_e en kg/cm ²	$P_{abs.}$ en kg/cm ²	P en kg/cm ²	$P-p$ en kg/cm ²	Δ en m/m.	$\sqrt{\Delta}$ $\times 10$
1,800	2,800	0,340	2,460	10	31,6
2,400	3,400	»	3,060	20	44,7
2,900	3,900	»	3,560	30	54,7
3,200	4,200	»	3,860	40	63,2
2,600	3,600	»	4,260	50	70,7
2,800	3,800	»	4,460	60	77,4
4,300	5,300	»	4,960	70	83,6
4,800	5,800	»	5,460	80	89,4
5,200	6,200	»	5,860	90	94,8
5,500	6,500	»	6,160	100	100
5,200	6,200	»	5,860	80	89,4
5	6	»	5,660	70	83,6
4,900	5,900	»	5,560	60	77,4
4,750	5,750	»	5,410	50	70,7
4,500	5,500	»	5,160	40	63,2
4,250	5,250	»	4,910	30	54,7
4	5	»	4,660	20	44,7
3,800	4,800	»	4,460	10	31,6
3,400	4,400	»	4,060	5	22,3

3) Tube de verre. - Diamètre 1,5 mm., longueur 1 m.

Mesures idiostatiques

P_e en kg/cm ²	$P_{abs.}$ en kg/cm ²	P en kg/cm ²	$P-p$ en kg/cm ²	Δ en m/m.	$\sqrt{\Delta}$ $\times 10$
0,500	1,500	0,530	0,970	5	22,3
0,700	1,700	»	1,170	10	31,6
0,800	1,800	»	1,270	25	50
1	2	»	1,470	35	59,1
1,200	2,200	»	1,670	55	74,1
1,400	2,400	»	1,870	75	86,6
1,500	2,500	»	1,970	110	104,8
1,600	2,600	»	2,070	135	116,1
1,700	2,700	»	2,170	150	122,4

Les mesures manquaient un peu de précision, étant donné notamment la difficulté de faire des lectures simultanées de la déviation de l'électromètre et du manomètre.

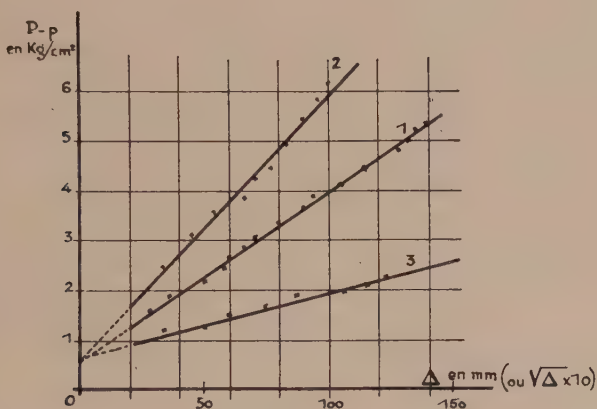


fig. 2.

Pour une pression donnée, la déviation de l'électromètre n'était, en effet, pas stable, on observait un lancé de l'aiguille, un arrêt de quelques secondes, puis un retour en arrière et brusquement un nouveau lancé. La pression augmentant progressivement et lentement, les elongations, c'est-à-dire les pointes lues au moment du lancé, étaient de plus en plus grandes et ce sont ces valeurs qui varient linéairement avec la pression.

J'ai cherché les raisons du phénomène pulsatoire observé, on peut en donner l'explication suivante :

La vapeur saturée produite dans la chaudière, s'écoule d'abord dans un tube de 15 mm. de diamètre. A l'endroit où se raccorde le tube de verre au tube de fer, la section, correspondant au diamètre de 15 mm. est brusquement réduite à celle correspondant au diamètre de 0,5 mm., il se produit à cet endroit des tourbillons qui se détachent de l'arête vive et qui donnent à l'écoulement cette allure irrégulière que j'ai retrouvée avec les tuyères (régime troublé).

J'ai observé les variations de la force électromotrice pour des différences de pression absolue variant de 1,5 à 6 kgs/cm² et un vide de 0,500 à 0,300 kg./cm². Je faisais monter progressivement la pression

d'admission, la pression d'échappement restant sensiblement constante. Chaque essai durait environ 1 heure.

En supprimant la source de chaleur, la pression baissait et la chute de potentiel était très rapide. Je n'ai pu noter aucune indication suffisamment précise.

La valeur de la force électromotrice produite, mesurée après étalonnage de l'électromètre, était de 15 à 20 volts pour une pression à la chaudière d'environ 5 kg./cm² pour les tubes de 0,5 mm. de diamètre, et de 30 à 40 volts pour la même pression avec les tubes, de 1,5 mm. de diamètre.

L'écoulement dans les tubes de faibles diamètres ne permet pas d'obtenir un jet continu de grande vitesse en raison des grandes pertes d'énergie cinétique produites par le laminage du fluide. Ces pertes sont sensiblement proportionnelles à la longueur, et j'ai pu obtenir des vitesses plus élevées en réduisant la longueur d'un mètre à 50 cm. et 20 cm., pour un même diamètre de 1,5 mm.

Les forces électromotrices mesurées sont plus élevées et toujours proportionnelles à la pression. J'ai obtenu des écoulements plus stables mais encore irréguliers.

2° La vapeur s'écoule dans des tuyères.

J'ai remplacé les tubes de verre par des tuyères convergentes-divergentes du même diamètre 1,5 mm. au col. Ces tuyères étaient fixées en bout du tuyau d'échappement de la petite chaudière et la vapeur s'écoulait, soit dans l'atmosphère (cette disposition m'a permis d'étudier la forme du jet de vapeur à la sortie de la tuyère), soit dans un condenseur à plus grande surface que dans les premières expériences, dans lequel le vide était fait au moyen d'une pompe qui extrayait en même temps que l'air, l'eau de refroidissement.

Dans le premier cas, la différence de potentiel était mesurée entre le tube d'admission et un tuyau métallique placé sur le trajet du jet de vapeur et suivant le même axe (fig. 6).

J'ai essayé une série de tuyères qui se ramènent toutes à deux types :

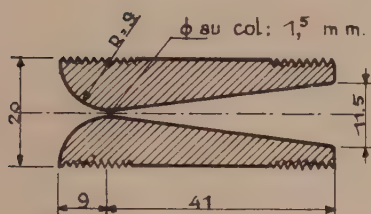
1° à profil très évasé (fig. 3) en matière isolante (bois bakérisé, ébène, stéatite) ou en cuivre.

2° à profil peu évasé (fig. 4) mais précédé d'un système de plaques transversales disposées en chicane, pour faire obstacle à l'écoulement avant l'entrée de la tuyère.

J'ai aussi employé avec succès des tuyères constituées très simplement en aplatissant un tube de cuivre jusqu'à ce que la section soit une fente très mince. Le dispositif de plaques en chicane est disposé à l'entrée. Ce type de tuyères dérive à la fois du type 1 et du type 2.

Les résultats obtenus avec les différents modèles, quant à la variation de la force électromotrice avec la pression, sont tout à fait concor-

TUYÈRE À AJUTAGE CONIQUE DIVERGENT



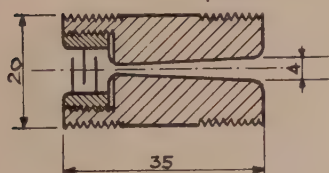
$$d_x = \left(1.5 + \frac{\ell_x}{4}\right) \text{ m.m.}$$

angle d'ouverture du cône:
env. 15°

fig. 3.

TUYÈRE AVEC ENTRÉE EN CHICANE ET AJUTAGE PEU DIVERGENT

φ au col : 2 m m.



$$d_x = \left(2 + \frac{\ell_x}{12}\right) \text{ m.m.}$$

fig. 4.

dants et je ne reproduis que deux courbes que j'ai relevées, l'une avec une tuyère du type 1, l'autre avec une tuyère du type 2 (fig. 5).

Les différences de potentiel mesurées atteignent de grandes valeurs, *plusieurs milliers de volts*, dès que la différence entre la pression P et la pression critique P_c dépasse environ un kilogramme par cm^2 .

Je crois devoir rappeler la loi qui régit l'écoulement de la vapeur

(ou de tout autre fluide compressible) dans des tubes présentant une section plus étroite que les autres : Si la vapeur s'écoule d'un réservoir où la pression est P , dans une enceinte où règne une pression inférieure p , la pression au col ne s'abaisse que jusqu'à une pression qui ne peut être inférieure à la pression critique P_c . Si p est plus petit que cette dernière, la vapeur se détend dans la partie divergente, de la pression critique à la pression p .

La valeur de la pression critique dépend de l'état du fluide et de la pression d'admission; pour la vapeur saturée sèche on a $P_c = 0.58 P$, elle est plus élevée pour la vapeur humide.

Dans le cas où la tuyère est évasée, la veine de vapeur est le siège de mouvements vibratoires qu'on distingue nettement au son.

J'analyserai plus loin cette particularité de l'écoulement dans les tuyères.

Etant donné les tensions élevées obtenues, j'ai fait les mesures avec un voltmètre électrostatique industriel dont la précision est suffisante, erreur de 2 à 3 p. 100.

J'ai constaté que pour une tuyère donnée, la force électromotrice varie encore linéairement avec la pression.

La pression p étant constante (pression atmosphérique), si j'augmente la pression d'admission, la pression critique augmente et atteint la valeur pour laquelle la vapeur se détend dans la partie divergente quand la pression P est égale à : $\frac{P}{0,58} = 1,73 p$ en supposant la vapeur saturée sèche (1).

La force électromotrice produite s'élève alors brusquement dès que la pression dépasse la pression critique. Il y a comme un amorçage de la tension qui monte ensuite très rapidement, et le rapport de la force électromotrice E à la différence de pression ($P - p$) est constant.

La vitesse dans le col de la tuyère, que j'ai calculée, varie alors très peu, mais il n'en est pas de même de la vitesse au delà qui augmente avec la pression d'admission.

Les tableaux suivants résument les résultats obtenus.

P . abs. est la pression absolue = la pression lue au manomètre
+ 1 kg./cm² (approximation suffisante).

(1) Voir chapitre II.

p est la pression d'échappement.

I est le débit de la vapeur en g./sec. mesuré par la diminution de l'eau contenue dans la chaudière.

V est la vitesse de l'écoulement en m./sec., calculée d'après la formule : $V=323 \sqrt{Pv}$.

v est le volume spécifique de la vapeur, à la pression P , en m^3/kg .

E est la différence de potentiel en volts.

VARIATION DE LA FORCE ELECTROMOTRICE EN FONCTION DE LA PRESSION

A. — *Tuyère en bois bakélisé à ajutage conique divergent.*

Diamètre au col 1,5 mm. — Ouverture du cône 15°.

L'échappement se fait à la pression atmosphérique ($p=1000$ g./cm²).
La vapeur se condense sur les parois d'un tuyau cylindrique ouvert.

P abs. en g./cm ²	P_c en g./cm ²	P_c-p	$\frac{p}{P}$	I en g./sec.	V en m./sec.	E en volts	$\frac{E}{P_c-p}$
1200	"		0,84	très faible			
1400			0,72	0,14	420		
1600			0,63	0,28	422		
1750	1010	10	0,58	0,56	423	très faible	
1900	1100	100	0,52	0,6	425	700	7
2000	1160	160	0,5	0,63	426	1200	7,5
2200	1270	270	0,45	0,71	428	2000	7,4
2500	1440	440	0,40	0,79	431	3000	6,8
3000	1730	730	0,33	0,95	436	5000	6,8

B. — *Tuyère en cuivre avec entrée en chicane et ajutage peu divergent.*

Diamètre au col 2 mm.

L'échappement se fait à la pression atmosphérique ($p=1000$ g./cm²).
La vapeur se condense sur les parois d'un tuyau cylindrique ouvert.

P abs. en g./cm ²	P_c en g./cm ²	P_c-p	$\frac{p}{P}$	I en g./sec.	V en m./sec.	E en volts	$\frac{E}{P_c-p}$
1250			0,80	très faible			
1300			0,77	0,18	419		
1550			0,64	0,36	421	très faible	
1800	1040	40	0,56	0,73	424	150	3,8
2000	1160	160	0,50	0,78	426	700	4,3
2250	1300	300	0,44	0,82	428	1200	4
2500	1440	440	0,40	0,92	431	2000	4,6
3000	1730	730	0,33	1,04	436	3000	4,1

Comme je l'ai signalé précédemment (1) il est remarquable *que le changement d'allure du phénomène électrique correspond au passage de l'écoulement du fluide en régime turbulent.*

J'ai employé le mot « turbulent » par opposition au mot « laminaire » définissant un régime entièrement différent qui satisfait à la loi de Poiseuille. Il s'agit d'un régime « troublé » qui est nettement tourbillonnaire.

Ce régime s'établit brusquement et reste stable.

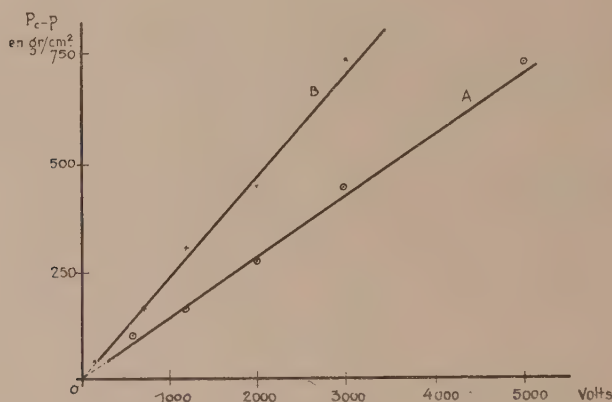


Fig. 5.

Je dois préciser certains résultats de mes essais de tuyères avec échappement de vapeur dans l'atmosphère, résultats qui concordent tout à fait avec les expériences de Faraday.

La chaudière était isolée comme précédemment sur trois pieds en porcelaine, mais j'ai renforcé l'isolement en les faisant reposer sur des isolateurs en verre. L'isolement dépassait ainsi 5.000 mégohms.

J'observais l'état électrique de la vapeur d'échappement en la faisant passer dans un tuyau en laiton de 20 cm. de diamètre et 60 cm. de longueur, isolé sur des pieds en verre et dans lequel étaient placés deux diaphragmes de toile métallique qui servaient à décharger la vapeur. Les deux bornes du voltmètre étaient branchées, l'une à la chaudière, l'autre au tuyau isolé.

(J'ai utilisé également, à la place du tuyau, un cône en toile métallique qui épousait sensiblement la forme du jet de vapeur).

(1) Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 198, 1934, p. 1586.

Lorsque le mélange de vapeur et d'eau passe dans la tuyère, il se produit un son qui est tantôt « soutenu et perçant », tantôt « aigu et inégal », on peut produire l'un ou l'autre en ouvrant plus ou moins le robinet d'admission (créant ainsi une variation de pression). *Le phénomène électrique correspond toujours au son inégal qu'accompagnent des vibrations irrégulières.*

Le premier effet qui se produit dès qu'on ouvre le robinet est un grand dégagement d'électricité, l'aiguille du voltmètre est lancée violemment au-dessus de la tension maximum, puis l'effet diminue et le régime stable est assez long à s'établir. Ceci s'explique par l'influence des gouttes de liquide entraînées par la vapeur, influence qui est primordiale, comme l'avait déjà remarqué Faraday. Quand le conduit d'amenée est froid, il y a plus d'eau condensée, l'équilibre s'établit quand le conduit, refroidi par l'air ambiant, condense toujours la même quantité de vapeur. La température extérieure doit donc avoir une influence, cependant dans les limites où elle variait, de 15° à 20°, les mesures étaient tout à fait concordantes. Mais si on refroidit le conduit d'arrivée de vapeur, soit par l'application d'un linge mouillé, soit par la projection d'un courant d'air froid, la force électromotrice augmente immédiatement. *La quantité d'eau entraînée par la vapeur intervient donc d'une façon importante.*

Evaluation de la puissance produite. — La quantité d'énergie pouvant être débitée est mesurable. Je l'ai déterminée approximativement en branchant à la place du voltmètre un condensateur de capacité connue qui se déchargeait dans une petite lampe au néon.

J'ai constaté d'abord que la force électromotrice diminue quand la machine débite; il faut une plus grande pression pour obtenir la même tension en charge. Dans le cas de mes essais de tuyère dont les résultats sont mentionnés au tableau A (page 19), la tension maximum obtenue ne dépasse pas 2.000 volts (au lieu de 5.000) pour une pression absolue d'admission de 3 kg./cm².

La puissance développée atteignait une valeur appréciable : le condensateur avait une capacité de 0,5 microforad, pour une tension aux bornes d'environ 2.000 volts, je comptais une décharge toutes les 10 secondes. La puissance débitée était donc de :

$$\frac{1}{2} \frac{C V^2}{t} 10^{-6} = 0,1 \text{ watt}$$

L'essai durait 10 minutes, le débit était remarquablement constant pendant les premières minutes, ensuite il se produisait des irrégularités sans que j'ai pu me rendre compte de leur cause.

La consommation de vapeur était d'environ un gramme à la seconde. La vapeur se détendait de 3 kg./cm² absolues à 1 kg./cm² absolue environ (atmosphère).

Remarque concernant les vitesses d'écoulement de la vapeur dans les tuyères expérimentées.

J'ai calculé les vitesses d'écoulement des tableaux A et B, d'après la formule indiquée :

$$V = 323 \sqrt{P_v}$$

il faut remarquer que cette relation donne la vitesse au col de la tuyère, dont on connaît la section. On sait que cette vitesse est précisément la vitesse du son dans le fluide (en l'occurrence mélange de vapeur et d'eau) dans l'état où il se trouve dans la section considérée.

Comme il est nécessaire, pour que le phénomène électrique « s'amorce », que la pression d'échappement soit inférieure à la pression critique — régnant dans le col — il s'en suit que les vitesses à l'aval, dans la partie divergente, atteignent une valeur plus élevée, c'est-à-dire *supersonique*.

J'examinerai au chapitre II les conditions de réalisations de ces vitesses. Je vais d'abord décrire des expériences qui renseignent sur l'état électrique de l'atmosphère où se fait l'écoulement, sur la répartition des potentiels et sur l'influence des gouttes de liquide entraînées par la vapeur.

3° Etat électrique de l'atmosphère où se fait l'écoulement de la vapeur.

Quand la vapeur s'échappe dans l'air, on observe que la différence de potentiel mesurée diminue dans le temps. Au bout de quelques instants, la tension, pour un régime donné d'écoulement, s'abaisse à une valeur notablement inférieure à celle primitivement obtenue. Cette chute est d'autant plus rapide que l'air ambiant est plus humide et on peut l'expliquer par des pertes de charge au sol.

La vapeur se répand en effet tout autour de l'appareil et, comme elle véhicule des charges électriques, il se produit une ionisation de l'air qui devient conducteur.

Les expériences que je vais décrire, précisent cette particularité.

Je fais écouler de la vapeur d'eau, qui donne un jet positif. Je mesure la différence de potentiel entre la tuyère et le tuyau C (fig. 6) placé dans le jet de vapeur. Ce dernier doit permettre le passage du jet, c'est donc un tuyau assez gros dont l'axe coïncide avec celui du jet. L'expérience montre qu'on peut le remplacer par une grille à larges

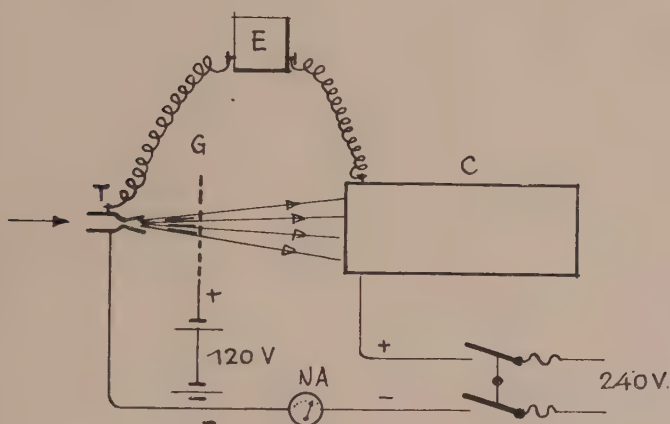


fig. 6.

mailles dont le plan est perpendiculaire au jet. Dans le premier cas le tuyau agit comme un cylindre de Faraday et capte une grande partie des charges, dans le deuxième cas, la grille est moins chargée et on constate une diminution de la tension mesurée.

Si on déplace le tuyau (ou la grille) en l'éloignant ou en l'approchant de la tuyère, la différence de potentiel ne varie pas notablement.

Je me sers normalement du tuyau comme collecteur de charge, il est fixé à environ 10 centimètres de la tuyère.

Si j'interpose, entre la tuyère et le tuyau, une grille G soigneusement isolée, la tension ne varie pas et la grille prend le même potentiel que le tuyau. Mais si je *polarise* la grille c'est-à-dire si je la charge indépendamment en la reliant au pôle d'une batterie de piles de 120 éléments, dont l'autre pôle est relié à la tuyère, la tension E varie.

La grille positive repousse une partie des charges positives émises par la tuyère et la tension diminue, la grille négative attire les charges positives dont une partie s'écoule par le circuit de la pile vers la tuyère et la tension diminue encore. Si la grille est au même potentiel que la tuyère, c'est-à-dire si la pile est mise en court-circuit (0 volt) la tension ne varie que très peu, les charges traversant la grille comme si cette dernière prolongeait la tuyère.

Ayant obtenu ce résultat, j'ai réuni le tuyau collecteur au pôle négatif d'un réseau à courant continu à 240 volts, l'autre pôle étant relié à la tuyère. Un microampèremètre intercalé dans le circuit, dévie de quelques divisions (dixièmes de micro-ampères) dès que l'on ferme l'interrupteur, ou que, l'interrupteur étant fermé, on lance le jet de vapeur.

L'espace rempli par la colonne fluide est donc devenu conducteur et il est ainsi possible d'avoir une mesure approchée de sa résistance électrique. On trouve ainsi pour la résistance d'une colonne qu'on peut grossièrement dimensionner à 10 cm. de longueur et 100 cm^2 de surface une valeur de 24.10^8 ohms, soit une résistivité de 24.10^9 . Si on fait passer un jet non électrisé la déviation du microampèremètre est imperceptible, montrant ainsi que la résistance est beaucoup plus grande et qu'il y a bien « ionisation » du fluide quand le phénomène électrique se produit.

Tout se passe comme si la tuyère émettait réellement un flux électronique qui serait capté plus ou moins par la grille formant « écran ».

Je préciserai plus loin les conclusions qu'on peut tirer de ces observations, à propos du fonctionnement caractéristique d'un tube dans lequel on fait le vide et où s'échappe la vapeur d'eau.

4° Répartition des potentiels.

Je me suis demandé quelle pouvait être la répartition des potentiels dans les différentes couches du fluide en mouvement à la sortie de la tuyère.

La vapeur s'écoulant dans l'atmosphère, j'ai utilisé pour cette recherche un dispositif très simple permettant d'explorer la colonne de fluide tant à l'extérieur de la tuyère qu'à l'intérieur dans la partie évasée.

Pour ces expériences la tuyère est du type 1 à ajutage divergent. Un fil de cuivre très fin est fixé dans l'axe d'un tube de verre taillé en pointe comme un crayon; à l'extrémité pointue ressort très légèrement le fil de cuivre qui communique à une borne de l'électromètre. L'autre borne est branchée sur la tuyère. Le tube de verre est maintenu sur un support rigide qui est monté lui-même sur un système à glissières permettant le mouvement suivant les trois axes de coordonnées au moyen de vis micrométriques.

La pointe exploratrice promenade à l'extérieur de la tuyère conserve très sensiblement le même potentiel dans tout le jet de vapeur, c'est la tension maximum. En dehors du jet la tension baisse progressivement mais conserve une valeur appréciable à une distance d'un mètre.

Dans le jet de vapeur, on peut s'approcher tout près de la tuyère, jusqu'à quelques millimètres, sans que soit sensiblement modifié le potentiel de la pointe. Si l'on avance davantage une étincelle jaillit — d'autant plus vite que le potentiel est plus élevé — qui décharge l'appareil.

Le même résultat est obtenu en explorant l'intérieur de la tuyère dans la partie conique divergente. *Le potentiel s'élève très rapidement aux abords de la paroi.*

Or l'expérience montre qu'aux abords de la paroi, dans un fluide en mouvement, il existe une couche de faible épaisseur où la vitesse varie d'une valeur nulle sur la paroi jusqu'à une valeur finie à partir de laquelle le gradient de vitesse devient très faible. Cette couche est la « couche limite ».

De même la force électromotrice, mesurée par la différence de potentiel entre la paroi et le fluide, varie d'une valeur nulle jusqu'à une valeur finie à partir de laquelle le gradient de potentiel est très faible.

On sait aussi qu'en régime troublé de l'écoulement, le gradient de vitesse est très grand. La vitesse — comme la différence de potentiel — croît très vite aux abords de la paroi.

Il y a là une coïncidence remarquable.

5) Résistivité du liquide entraîné par la vapeur.

L'eau que j'ai utilisée était de l'eau de ville qui contenait des impuretés, des traces de ces impuretés étaient contenues dans les gouttes. La nature des substances se trouvant, même en très petites quantités,

dans le liquide vaporisé a une grande influence. C'est un fait d'expérience qui peut s'expliquer par les modifications de la résistivité du liquide contenant des substances dissoutes.

Le rôle de la vapeur ne serait ainsi que de véhiculer les particules liquides en les soumettant à une violente agitation. (*)

Mes premières observations ont été faites sur le changement du sens de la force électromotrice obtenue par la modification de la composition du liquide. Le jet de vapeur étant normalement positif, j'ai constaté une inversion alors que l'eau contenait des traces de carbonate

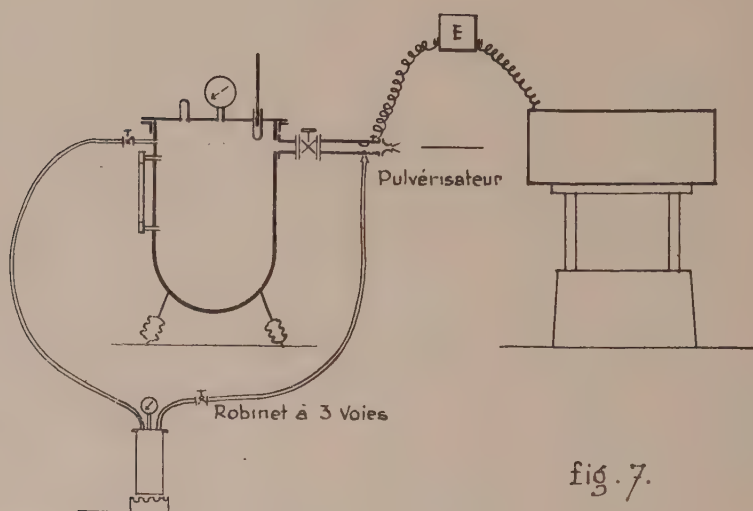


fig. 7.

de soude ayant servi à nettoyer la chaudière. Il fallut alors remplir plusieurs fois la chaudière avec de l'eau (impure mais non alcaline) pour obtenir à nouveau le jet positif.

J'ai remarqué la même inversion de polarité par la présence de faibles quantités d'huile, — alors que j'en avais introduit dans la chaudière pour observer les effets de la viscosité.

(*) L'écoulement de la vapeur sèche ne produit pas d'électrisation, si je chauffe, par exemple, le tuyau d'arrivée au dessus de la température de saturation (surchauffe), le voltmètre revient à zéro.

Pour étudier l'influence des substances dissoutes dans l'eau, j'ai adjoint un dispositif pris en dérivation sur la chaudière (fig. 8) qui permet de faire passer à volonté dans la tuyère des gouttes très divisées de solutions de composition connue.

Ce dispositif comporte essentiellement une bouteille métallique en acier (comme la chaudière) contenant le liquide à essayer. Son couvercle, maintenu par quelques boulons, est facilement amovible. De cette façon la bouteille peut être très facilement nettoyée et rincée pour enlever toute trace de la solution précédente.

Le couvercle porte d'une part, une tubulure qui est reliée par un tuyau à la partie supérieure de la chaudière, — un robinet permet cette liaison à volonté, — d'autre part, un tube plongeant jusqu'à quelques centimètres du fond de la bouteille et relié à la canalisation de vapeur, à l'aval de la tuyère. Ce tube se termine par un ajutage très fin, comme un « gicleur » de carburateur, qui pulvérise le liquide à son entrée dans le tuyau de vapeur. Un petit manomètre contrôle la pression de la bouteille, qui est la même que celle de la chaudière quand le robinet est ouvert. En fermant insensiblement le robinet principal d'admission de vapeur, on crée une légère dépression et le liquide pulvérisé s'échappe dans la vapeur.

J'ai étudié ainsi l'effet produit par l'écoulement de la vapeur entraînant des gouttes de solutions aqueuses différentes, à réaction acide ou basique, de diverses concentrations. J'ai observé des modifications très importantes de l'effet électrogénique qui semble dépendre à la fois de la conductivité de la solution et de son degré d'acidité *réelle* — (c'est-à-dire de la quantité d'ions H réellement présents par unité de volume).

Les solutions doivent être très diluées, les concentrations supérieures à 0,001 N (un millième de molécules par litre), donnent une trop grande conductibilité et la tension est très faible ce qui explique que des traces d'impureté peuvent avoir de l'influence.

La différence de potentiel mesurée reste proportionnelle à la pression d'admission, le rapport $\frac{E}{P_c - p}$ restant constant. Mais ce rapport diminue en même temps que la conductibilité augmente. Comme le montre le tableau suivant résumant les résultats obtenus, *ce rapport varie dans le même sens et sensiblement proportionnellement à la résistance du liquide.*

VARIATION DE LA FORCE ELECTROMOTRICE
EN FONCTION DE LA RÉSISTIVITÉ DU LIQUIDE ENTRAÎNÉ

Tuyère en cuivre avec entrée en chicane et ajutage cylindrique
Section minima : 3 mm².

L'échappement se fait dans l'atmosphère ($p = 1000$ g/cm²).

Solution (0,001 N)	$P_c - p$ en g/cm ²	E en volts	$\frac{E}{P_c - p}$	χ en ohms/cm	ρ en ohms/cm
SO ⁴ Cu	180	100	0,56	0,9.10 ⁻⁴	11,1.10 ³
	460	250	0,54		
NaCl	300	125	0,42	1,2.10 ⁻⁴	8,4.10 ³
	480	200	0,42		
NaOH	440	100	0,23	2,1.10 ⁻⁴	4,9.10 ³
	650	150	0,23		

χ est la conductivité, d'après le Recueil des constantes physiques.

ρ est la résistivité.

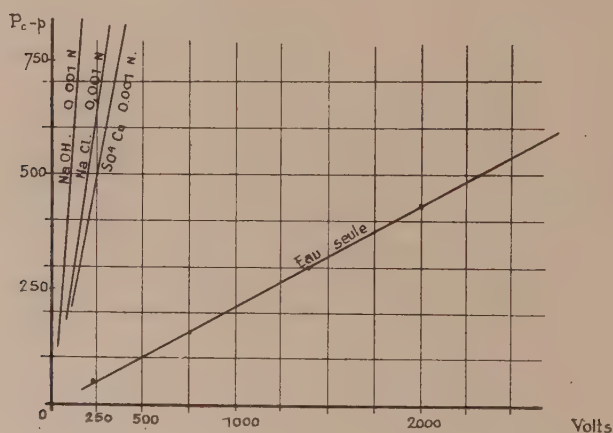


Fig. 8

La figure 8 donne les courbes traduisant les résultats du tableau; on y a reproduit la courbe obtenue avec de l'eau seule (1) en utilisant

(1) De l'eau de ville, non pure. L'installation dont je disposais ne m'a pas permis de faire des expériences avec de l'eau distillée très pure, ce qui serait intéressant.

la même tuyère. Le coefficient angulaire de la droite représentant la fonction $E=f(p)$ est proportionnelle à la résistivité.

En ce qui concerne l'acidité, elle intervient pour la polarité. Avec de l'eau seule le jet de vapeur est généralement positif. Mais la moindre impureté rendant le liquide légèrement alcalin change la polarité; ce qui explique les anomalies que j'ai constatées. L'introduction dans la vapeur de gouttelettes de liquide de composition connue montre qu'une solution acide donne un jet positif, une solution basique un jet négatif. La tuyère est toujours de signe contraire. Le phénomène est très net à observer : quand on fait écouler de la vapeur d'eau seule et que l'on introduit la moindre trace de solution basique, la polarité change et il faut neutraliser les traces alcalines pour avoir à nouveau un changement de polarité. Des traces d'huile donnent le même résultat qu'une solution alcaline ce qui peut s'expliquer par la saponification de l'huile à une température dépassant 100°.

J'indiquerai plus loin comment le changement du sens de la f.e.m. peut être déduit des règles qualificatives établies par J. Perrin d'après son étude expérimentale sur l'osmose électrique, qui renseigne sur les variations de la différence de potentiel au contact d'une paroi et d'un liquide lorsqu'on modifie la composition de ce dernier.

Toutes les autres conditions restant les mêmes, la tension mesurée avec l'expulsion d'un liquide légèrement conducteur, est de l'ordre de la centaine de volts (au lieu de quelques milliers avec l'eau). Mais il semble que la quantité d'électricité pouvant être débitée soit supérieure. J'ai pu en effet obtenir, par intermittence, des courants de l'ordre du milliampère — qui rendent lumineuse une lampe au néon placée aux bornes — ce qui, sous 110 volts, donne la même puissance que celle que j'ai mesurée précédemment en comptant le nombre de décharge d'un condensateur de capacité connue dans un temps donné.

Remarques sur l'écoulement des fluides autres que la vapeur d'eau.

— Afin de rechercher les causes, qui restaient inexplicées, d'explosions provoquées par l'allumage apparemment spontané d'un jet gazeux s'échappant d'un récipient, l'Office technique de Berlin a fait une série d'expériences.

Les résultats de ces expériences sont mentionnés dans un « Rapport présenté au 11^e congrès international de l'acétylène », tenu à Rome en juin 1934.

Les gaz, tels que l'hydrogène, l'oxygène ou l'acétylène, sont contenus dans des bouteilles en acier que l'on place sur des supports isolants (plaques de paraffine). On mesure la différence de potentiel entre la bouteille — le fil relié à l'une des bornes de l'électromètre est soudé au robinet d'échappement — et le sol. Quand les bouteilles sont debout, on n'obtient aucun effet électrique, mais si les bouteilles sont couchées, on observe des tensions élevées atteignant 5.000 volts pour des pressions dans les bouteilles de 10 à 12 atmosphères.

Dans la deuxième position le liquide, qui se trouve toujours dans les gaz produits industriellement, eau pour l'hydrogène et l'oxygène, acétone pour l'acétylène, est entraîné avec le jet gazeux. Le passage du liquide dans l'ouverture étroite du robinet, où se produit la détente du fluide, se manifeste immédiatement par la production d'une force électromotrice et de petites étincelles jaillissent entre deux pointes distantes de 0.4 mm. pour une tension de 2.000 à 2.500 volts.

La tubulure par laquelle s'échappe le jet a une section de 0.78 mm^2 correspondant à un diamètre de 1 mm., la longueur est de 2.8 mm. Ces dimensions sont tout à fait semblables à celles des tuyères que j'ai expérimentées avec de la vapeur d'eau.

Des essais ont été faits également avec de l'air et de l'azote. Si les gaz sont séchés préalablement par le passage sur du chlorure de calcium ou du charbon actif, on n'a pas d'électrisation, si grande soit la pression, mais si l'on mélange aux gaz de l'acétone, de l'éther ou de l'eau, on obtient des charges très importantes. La valeur de ces charges dépend de la nature et de la quantité du liquide contenu dans le gaz, pour le même débit de ce dernier. L'état hygrométrique de l'atmosphère a également une influence.

Ces expériences montrent que les explosions qui se sont produites, sans raison apparente, peuvent parfaitement être attribuées à la production de petites étincelles électriques. Elles confirment les résultats que j'ai obtenus et notamment qu'il faut que le gaz ou la vapeur qui s'écoule, contienne des particules liquides.

CHAPITRE II

Différents facteurs intervenant dans la production
de la force électromotrice1° Particularité de l'écoulement de la vapeur d'eau dans un tube
présentant une section étranglée.

L'existence d'une pression critique et les conditions de l'écoulement d'un fluide compressible dans une tuyère, rappelées ci-dessus, résultent de l'expérience. Elles peuvent être déduites de l'étude analytique du mouvement du fluide en supposant une détente adiabatique, ce qui correspond de très près à la réalité étant donné que le fluide passe très rapidement (en quelques dixièmes de seconde) et qu'il ne cède, ni ne reçoit aucune quantité de chaleur appréciable.

En partant des relations $\frac{V^2}{2g} = \int_p^P v dp$ et $p v^\gamma = C^*$

on détermine la vitesse $V = \sqrt{2g \frac{\gamma}{\gamma-1} P v \left[1 - \left(\frac{p}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$ (1)

γ , rapport des chaleurs spécifiques du fluide, est pour la vapeur d'eau :

$$\gamma = 1,035 + 0,1 x$$

cette formule est valable si la vapeur est initialement saturée et humide avec un titre x . Pour $x=1$ on a $\gamma=1,135$.

Cette relation (1) donne la loi de variation de V avec P si p est constant (ou réciproquement la loi de variation de V avec p si P est constant).

La courbe représentant la fonction $V=f(p)$ a un point d'inflexion(*)

(*) En effet, si dans la relation (1), $p = P$, la vitesse est nulle et si $p = 0$, la vitesse est infinie; d'autre part, $\frac{dV}{dp}$ est infinie et les tangentes à la courbe $V=f(p)$ sont verticales aux points $p=P$ et $p=0$.

pour une certaine valeur de p qui est la *pression critique* à laquelle correspond la vitesse critique. Ce point d'inflexion a une signification physique importante : il correspond à un changement de régime dans l'écoulement du fluide révélant, non seulement l'existence d'une vitesse critique, dans la section minimum, — vitesse qui est égale à la vitesse du son dans le fluide, — mais aussi une *discontinuité* dans l'écoulement quand la pression à l'échappement p est inférieure à la pression critique.

Un fluide est caractérisé par la valeur de γ . La grandeur du coefficient, que j'appelle h , rapport entre la pression critique P_c et la pression d'admission P en dépend directement. On l'obtient en annulant la dérivée seconde de V par rapport à p , ce qui donne :

$$P_c = P \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = hP \quad (2)$$

En portant cette valeur de la pression critique dans (1) on en déduit la vitesse critique :

$$V_c = \sqrt{2g \frac{\gamma}{\gamma+1} P v} \quad (3)$$

Soit à une section quelconque de la tuyère, traversée pendant l'unité de temps par un poids Q de vapeur. On a,

$$s = \frac{v}{V} Q \quad (4)$$

En introduisant la valeur V de la formule (1), on a une relation qui donne la loi de variation de la section en fonction de p , lorsque la pression P et le débit Q sont constants, ainsi que la loi de variation de la section le long de la tuyère, étant donné la pression d'échappement, pour obtenir, dans les différentes sections, la pression que l'on désire.

En particulier, si $V = V_c$, la section a une valeur minimum s_c qui correspond au point d'inflexion de la courbe $V = f(p)$.

Si on veut faire écouler un poids Q de vapeur à travers un tube profilé pour réaliser une détente adiabatique, dans le cas où la pression à l'échappement (p_s) est inférieure à la pression critique, la valeur

des sections successives ira en diminuant jusqu'à la section critique pour augmenter ensuite.

C'est dans ce cas que je me suis placé pour déterminer le profil d'une première tuyère convergente-divergente et *l'expérience m'a montré que le phénomène électrique se produit quand la partie divergente est nettement évasée*, c'est-à-dire, quand il se produit, à l'aval du col, des mouvements tourbillonnaires du fluide, bien connus des constructeurs de turbines (1).

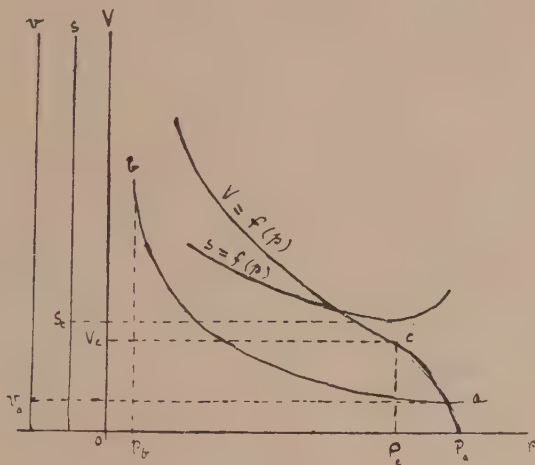


fig. 9

Les expériences sur les tuyères, que j'ai exposées au chapitre I, ont donc mis en évidence un fait essentiel : l'électrisation du jet est étroitement liée au phénomène connu sous le nom de régime « turbulent », dans la détente de la vapeur. Il en résulte que *la force électromotrice se produit, dans le jet, au delà du col de la tuyère*, et non par frottement dans la partie étranglée.

De nombreuses observations, sur lesquelles je reviendrai, m'ont montré qu'il en était bien ainsi.

La figure (9) donne les courbes représentatives des fonctions $V=f(p)$ et $s=f(p)$. La courbe ab représente une transformation adiabatique de la pression initiale P jusqu'à la pression p_b du milieu dans lequel s'écoule la vapeur.

(1) Stodola, *Les turbines à vapeur*, Dunod, 1906, p. 101.

Il faut remarquer que le point d'inflexion n'existe, sur la courbe $V=f(p)$, seulement dans le cas où la valeur de la pression d'échappement p est plus petite que la pression critique. C'est obligatoirement toujours le cas de mes expériences.

La pression dans la section étranglée est alors toujours P_c , indépendante de p , et la vitesse dans cette section est V_c . Au delà de cette section la vitesse croît *brusquement* jusqu'à ce que la pression soit p .

En portant la valeur, déterminée expérimentalement, de γ dans (2) et (3), on obtient *pour la vapeur saturée sèche* ($x=1$) :

$$P_c = 0,5774 P \text{ (en chiffre rond } 0,58 P)$$

$$V_c = 323 \sqrt{Pv}$$

Si P est en kg./cm^2 et v en $\text{m}^3/\text{kg.}$, la vitesse est en m/sec.

Ces valeurs varient avec le titre de la vapeur. On peut néanmoins les prendre comme valeurs approchées et elles m'ont servi pour calculer les vitesses dans les tuyères (tableaux A et B). Le titre étant certainement très inférieur à l'unité, les nombres trouvés sont trop grands, mais l'erreur ne dépasse pas la précision des mesures faites.

L'examen des courbes $V=f(p)$ et $s=f(p)$ montre que dès que la vitesse du fluide dépasse V_c (supersonique), les vitesses et sections varient dans le même sens, toute augmentation de section entraîne une augmentation de vitesse. Ceci se déduit d'ailleurs de la relation d'Hugoniot, qui s'applique à l'écoulement permanent d'un fluide compressible dans une tuyère :

$$\frac{ds}{s} + \frac{dV}{V} \left(1 - \frac{V^2}{\Omega^2} \right) = 0$$

Ω est la célérité du son. Cette relation exprime le principe de la conservation de l'énergie pour un déplacement qui amène le fluide de la section s à la section $(s+ds)$ dans une transformation adiabatique. Si $V > \Omega$ la vitesse varie comme la section.

Au delà du col, dans la partie divergente, la vitesse augmente donc dès la sortie, en même temps que la pression diminue, mais *elle atteint plus ou moins rapidement une valeur maximum* — car elle doit inévitablement revenir à une valeur inférieure dans le milieu où règne

la pression p . En une région située après le col, il y a ainsi obligatoirement une *discontinuité* dans la vitesse et il doit en résulter une perte d'énergie cinétique accompagnée de variations brusques de la température et de la pression.

Les considérations précédentes, qui se déduisent de la théorie, ont été vérifiées par de nombreuses expériences. Tout récemment Santon (1) a établi, par des essais systématiques, que, sous la condition que le rapport entre la pression amont et la pression aval soit suffisant pour permettre l'existence de cette vitesse supersonique — ce qui correspond à la production du phénomène électrique — la veine du fluide remplit tout le divergent, quel que grand que soit son évasement. *Le fluide, bien qu'animé de grandes vitesses, incurve sa trajectoire pour épouser le contour des parois.*

Ce résultat concerne de l'air s'écoulant dans des tuyères d'assez grandes dimensions (1 dm^2 de section au col), mais il doit en être de même pour l'écoulement de la vapeur dans les tuyères de dimensions réduites de mes expériences. L'influence des parois, aux abords immédiats desquelles se produit la force électromotrice, est en effet nettement établie par l'étude de la répartition des potentiel.

Le fait que la vapeur doit nécessairement contenir des gouttes de liquide, rend plus complexe le phénomène.

. . .

La valeur de la pression critique augmente quand le titre de la vapeur diminue. Rateau (2) a déterminé que, pour l'écoulement de l'eau chaude qui se trouve dans un réservoir exactement à la température de la vapeur correspondant à la pression P , et qui se vaporise partiellement dès que la pression s'abaisse, la pression critique est d'environ 80 p. 100 de la pression P .

On peut donc admettre que, pour l'écoulement de la vapeur contenant des gouttelettes d'eau, la pression critique est comprise entre 0,58 et 0,80 de la pression initiale.

D'autre part, le débit du fluide, qui est proportionnel à la pression initiale — puisque la pression d'échappement est inférieure à la

(1) Santon, *Contribution expérimentale à l'étude des souffleries supersoniques*. Thèse, 1935.

(2) A. Rateau, *Annales des Mines, Mémoires*, 10^e série, t. I., 1902, p. 59.

pression critique — augmente quand le titre diminue. Il est donc supérieur à 145 grammes, par centimètre carré de section et par seconde, pour tout kg./cm^2 de pression absolue, valeur déterminée pour la vapeur saturée sèche.

Le liquide contenu dans la vapeur, se vaporise, tout au moins en partie, dès que la pression et la température s'abaissent. Il y a donc, à la sortie du col de la tuyère, un mélange d'eau et de vapeur. Le fluide entrant dans une enceinte où la pression est beaucoup plus basse, par exemple l'atmosphère, fait « explosion » — expression employée par Rateau — *beaucoup plus fortement que dans le cas de l'écoulement de la vapeur seule*. Le phénomène est en quelque sorte amplifié, mais la théorie développée précédemment, reste la même.

On peut résumer ce qui se passe dans la tuyère, corrélativement au phénomène électrique :

Le fluide, mélange d'eau et de vapeur, après avoir atteint la vitesse correspondant à la pression critique dans le col, se détend brusquement au delà en prenant une vitesse supersonique. Le jet épouse le contour de la paroi, quel que soit l'évasement du divergent. La vitesse considérée est donc celle du fluide dans l'axe du jet, elle varie dans la section et s'annule le long de la paroi aux abords immédiats de laquelle le gradient de vitesse est très élevé (régime troublé).

La valeur de la vitesse peut encore être déterminée d'une autre façon en écrivant que l'énergie cinétique $V^2/2g$ de l'unité de poids du fluide est égale à l'énergie représentée dans le diagramme entropique ou le diagramme de Mollier. On trouve ainsi :

$$V = 91,53 \sqrt{\lambda_P - \lambda_p}$$

λ_P est la quantité de chaleur que possède la vapeur à la pression P .

λ_p est la quantité de chaleur que possède la vapeur à la pression p .

Cette méthode est équivalente à la première. Si les quantités de chaleur sont exprimées en grandes calories, la vitesse est en m/sec.

Quelle que soit la façon dont on détermine V , il est indispensable de connaître l'état initial de la vapeur, c'est-à-dire son titre, pour avoir la vitesse dans le col de la tuyère. Or l'expérience a montré que le phénomène électrique ne se produit que s'il y a dans la vapeur des

gouttes d'eau. C'est une condition essentielle. La vapeur doit donc être très humide. J'étudie ci-après l'influence des gouttes de liquide entraînées. Je vais examiner auparavant comment se répartissent les vitesses et les pressions à l'intérieur du tube.

Si le profil des tuyères est tel que le fluide remplisse exactement les différentes sections successives, la veine suit la paroi et l'on obtient à la sortie des filets parallèles. Par contre une variation brusque dans le profil, l'étranglement ou l'élargissement des sections, ou encore l'allongement au-delà de la section maximum, produisent des perturbations, chocs et tourbillons qui donnent à l'écoulement une allure toute différente.

La répartition des vitesses et des pressions à l'intérieur du tube est complètement modifiée. Si par exemple, pour une tuyère, la section finale est plus grande que celle qui correspond à la valeur de la vitesse réelle, la veine se sépare de la paroi et il se produit une variation brusque de pression.

Stodola (1) a étudié expérimentalement l'effet d'une pression d'aval surélevée. Je reproduis ci-contre (page 38) les courbes qu'il a obtenues parce qu'elles correspondent tout à fait aux observations que j'ai faites. Si, en fermant plus ou moins un robinet placé entre la tuyère et le condenseur, on crée une contre-pression, on fait varier p en laissant P constant. La force électromotrice mesurée baisse alors en même temps que p augmente et inversement, mais la variation n'est pas continue.

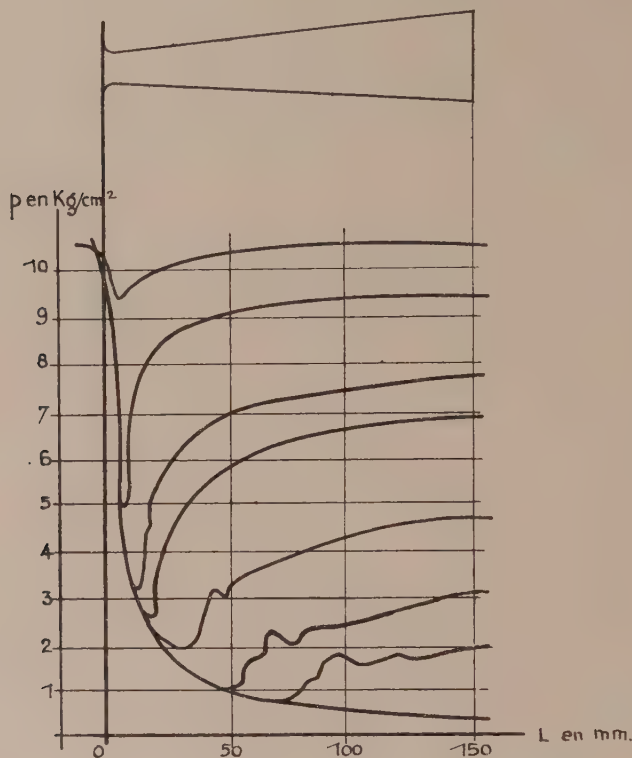
A tout changement de pression, aussi lent soit-il, il se produit des oscillations de l'aiguille du voltmètre qui s'expliquent par le changement de régime dans l'écoulement de la vapeur. La section dans laquelle se produit le choc initial, se déplace le long de la tuyère, comme le montrent les courbes.

Quand la vapeur s'échappe dans l'atmosphère, les mouvements vibratoires sont très visibles. Ils se traduisent dans la veine de vapeur par des lignes claires et foncées situées à intervalles réguliers.

L'observation du jet sortant de la tuyère renseigne donc sur les caractéristiques de l'écoulement à l'intérieur. J'ai photographié le jet au moyen d'un dispositif qui permet un éclairage instantané par étin-

(1) Stodola, *Les turbines à vapeur*, traduit par Hahn, 1906, p. 71.

celle d'induction; le jet apparaît sous la forme d'ondes stationnaires déformées par le régime tourbillonnaire.



Sur l'axe des abscisses on porte la longueur de la tuyère et sur celui des ordonnées la pression que prend la vapeur dans son mouvement.

En régime établi, il se propage un train d'ondes qui part de l'orifice et atteint le conducteur sur lequel est projeté le jet et qui constitue l'un des pôles relié à l'électromètre.

Il faut remarquer que les ébranlements qui se produisent ont une

valeur finie et qu'en raison des discontinuités, la vitesse de la propagation de l'onde n'est pas égale à celle du son dans le fluide. On peut avoir un ordre de grandeur de la longueur d'onde λ par la formule établie par Prandtl (1) en supposant des variations infiniment petites de la pression et de la vitesse. Pour un orifice circulaire de diamètre d par laquelle la vapeur s'écoule à la vitesse V , il a trouvé :

$$\lambda = 1.307 d \sqrt{\frac{V^2}{c^2} - 1}$$

c est la vitesse du son dans le fluide. Le mouvement vibratoire ne se produit que lorsque la vitesse réelle de la vapeur est supérieure à celle du son. *La production de la force électromotrice dépend aussi de cette condition.*

2) Rôle de la tension superficielle.

Le son que l'on distingue, à la sortie de la tuyère, est semblable au crissement que l'on entend quand on fait tomber des gouttes d'eau sur une plaque portée à haute température. On sait que, tant que la plaque est très chaude, les gouttes sont complètement entourées de leur propre vapeur et leur forme sphéroïdale est due à leur tension superficielle. Dès que la plaque est assez refroidie pour que la chaleur rayonnée ne soit plus suffisante pour assurer la vaporisation superficielle, les gouttes s'évalent et se vaporisent brusquement. On a l'impression que les gouttes *éclatent*.

C'est ce son caractéristique que l'on entend, quand le phénomène électrique se produit, c'est-à-dire quand la tension s'amorce, comme je l'ai dit plus haut.

Par analogie, je pense qu'à la sortie de l'étranglement de la tuyère, il se produit une vaporisation instantanée des gouttes véhiculées par la vapeur.

Cette conception correspond tout à fait à l'idée de Rateau : l'éclate-

(1) *Physikalische Zeitschrift*, 1904, p. 599.

ment simultané d'une série de gouttes explique bien « l'explosion » du jet.

Ce phénomène serait semblable à l'électrisation produite par la chute et l'écrasement des gouttes, étudiée par J.J. Thomson (1).

Ce physicien a observé qu'en faisant écouler un liquide, contenu dans un entonnoir métallique, le liquide tombant goutte à goutte sur un plateau, on constate une différence de potentiel entre l'entonnoir et le plateau. Cette différence de potentiel est mesurée par un électromètre; on peut aussi prendre la déviation de cet appareil pour mesure de la quantité d'électricité produite par la chute des gouttes, quand une quantité de liquide déterminée tombe sur le plateau.

A l'aide de ce dispositif, J.J. Thomson a recherché l'influence de conditions expérimentales diverses sur le mode d'électrisation développée.

Comme pour l'écoulement de la vapeur transportant des gouttes liquides, de faibles changements dans la composition de liquide affectent, dans des proportions tout à fait remarquables, cette production d'électricité. De même les effets électrogéniques dus à des solutions faibles sont beaucoup plus intenses que ceux provenant de solutions fortes. Des solutions très chargées, pour toutes les substances essayées, n'ont donné lieu, dans la chute et l'écrasement des gouttes, qu'à des effets électriques très faibles ou même nuls.

Le sens de l'électrisation varie aussi suivant la composition des gouttes : pour l'eau tombant dans l'air, la goutte prend une charge positive, l'air une charge négative; la chute de gouttes faiblement alcalines développe dans l'air, une charge positive et non plus négative.

L'effet électrique ne se produit qu'au moment où la goutte frappe le plateau. (De même, une goutte de pluie, pendant son passage dans l'air, ne semble pas laisser derrière elle de traces d'électricité, c'est seulement au sol que l'air est électrisé.)

J.J. Thomson explique l'électrisation produite en supposant qu'il existe à la surface de séparation des gouttes, une couche double d'élec-

(1) J.J. Thomson, *Les décharges électriques dans les gaz*, traduit par Barbillion, Gauthiers-Villars, 1900, p. 12.

tricité. Lorsque la goutte rencontre le plateau, la couche double subit une action mécanique violente, la couche se sépare en ses deux éléments de signes contraires, en même temps que s'accroît la surface de la goutte écrasée.

Cette couche double doit se rencontrer à la surface de séparation de deux milieux quelconques, à l'état liquide ou gazeux. Il y a là une corrélation avec l'existence de la tension superficielle. Ce qui le confirme, c'est que, si on fait tomber les gouttes d'eau dans une atmosphère de vapeur très humide, leur tension superficielle diminue, il en est de même de l'électrisation produite.

On sait, d'autre part, que la présence d'une charge électrique sur une goutte d'eau très petite, tend à neutraliser l'action de la tension superficielle. Le phénomène observé serait l'inverse. La formation dans l'air (par exemple) d'une goutte de liquide, correspond à un accroissement d'énergie potentielle qui est égale à la surface de la goutte multipliée par la tension superficielle entre les milieux air et eau (environ 75 ergs/cm^2). Inversement, lorsque la surface d'eau change de valeur, l'énergie potentielle varie en même temps qu'une électrisation se manifeste.

Le fait que le déplacement d'une charge électrique peut, ainsi, être dû à un changement de la surface, peut expliquer la formation de la force électromotrice. La valeur de cette dernière sera d'autant plus élevée que la variation de la surface sera plus rapide. C'est pourquoi l'on obtient des tensions très élevées par la détente du jet de vapeur, dans l'hypothèse, qui semble ainsi confirmée, de l'éclatement des gouttes dans la partie divergente de la tuyère.

Ce qui tend à fortifier encore cette opinion, c'est que, si l'on mesure la différence de potentiel entre l'air et différents liquides, on trouve que les substances qui, ajoutées à l'eau, exercent une vive influence sur la valeur de la différence de potentiel, sont les mêmes qui agissent énergiquement sur la tension superficielle.

3) Remarque sur le sens de la force électromotrice.

J'ai obtenu des changements de polarité par l'écoulement de solutions acides ou basiques. Or l'une des bornes de l'électromètre est

toujours reliée à la tuyère — ou à tout autre conducteur lié électriquement à la tuyère. J'ai remarqué, d'autre part, que le fluide suit le contour de la paroi, semblant s'y attacher le plus possible, le fluide mouille donc la paroi.

Le sens de la force électromotrice ne dépendrait-il pas de l'électrisation au contact de cette paroi? Les résultats de mes expériences sont à rapprocher de ceux obtenus par J. Perrin, dans l'étude de l'osmose électrique.

J. Perrin a étudié expérimentalement (1) le phénomène d'osmose électrique qui s'explique par l'électrisation de contact. Il en a déduit quelques règles qualitatives qui renseignent sur les variations de la différence de potentiel au contact d'une paroi et d'un liquide lorsqu'on modifie la composition de ce dernier.

Cette étude a été faite pour des solutions aqueuses d'électrolytes, — comme celles que j'ai utilisées, — et s'applique à toute paroi non métallique. Cependant, après avoir fait des essais avec des tubes en verre et des tuyères en matières isolantes, plus spécialement en bois bakélinisé, j'ai reconnu que des tuyères en cuivre donnaient des résultats tout à fait semblables, le profil seul intervenant, comme je l'ai indiqué ci-dessus. Et il semble que l'on peut ainsi étendre la théorie de J. Perrin à une paroi quelconque.

Voici les résultats expérimentaux :

Si une paroi est électrisée positivement, elle se chargera plus fortement si l'on ajoute au liquide aqueux qui la baigne un acide monovalent; elle se déchargera graduellement, puis se chargera négativement, si l'on ajoute de plus en plus une base monovalente.

Si la paroi est électrisée négativement, l'addition d'acide monovalent diminuera la charge, puis produira une charge positive, tandis que l'addition de base augmentera la charge négative.

RÈGLE I. — En général, *une paroi est positive dès que la solution est nettement acide au tournesol, et négative dès qu'elle est basique au même réactif coloré.*

(C'est exactement ce que j'ai observé.)

Cependant le changement de signe ne se produit pas à la même

(1) Perrin, *Journal de Chimie physique*, t. II, 1904, p. 601.

concentration d'acide ou de base, pour toutes les parois, aussi la règle suivante est beaucoup plus générale.

RÈGLE II. — *Le potentiel électrique d'une paroi quelconque en solution aqueuse est toujours élevé par l'addition dans cette solution d'un acide monovalent, et il est toujours abaissé par addition d'une base monovalente.*

L'influence de la concentration des ions H^+ des acides monovalents, ou des ions OH^- des bases monovalentes est donnée par la règle suivante :

RÈGLE III. — *Le potentiel d'une paroi quelconque grandit quand la solution devient plus riche en ions H^+ , il décroît quand elle devient plus riche en ions OH^- .*

Dans la charge d'une paroi plongée dans une solution aqueuse d'électrolyte, l'influence des ions H^+ et OH^- est très importante.

Quant à l'influence des ions polyvalents, elle est donnée par la règle suivante :

RÈGLE IV. — *Si à un liquide donnant à une paroi une électrisation d'un certain signe, on ajoute un ion polyvalent du signe opposé, l'électrisation de la paroi est beaucoup diminuée, si on en ajoute suffisamment elle change de signe.*

Par exemple l'ion SO_4^{4-} du sulfate en solution acide diminue fortement l'électrisation que produit l'ion H^+ .

Les règles, déduites d'expériences, sur l'osmose électrique, que je viens de rappeler, permettent de prévoir *qualitativement* les résultats que j'ai obtenus quant aux changements de sens de la force électromotrice.

Il semble donc qu'il puisse y avoir une certaine assimilation entre les phénomènes d'osmose et d'écoulement de liquide propulsé par la vapeur, à travers d'étroites ouvertures. Et en effet, les deux phénomènes dépendent d'une différence de pression et on a pu expliquer la pression osmotique en assimilant la dissolution d'un corps dans un

liquide à la vaporisation dans un espace vide; la pression osmotique est ainsi analogue à celle d'une vapeur.

J. Perrin a cru devoir limiter l'application des règles qu'il a établies, aux seules parois non métalliques, les mêmes résultats que j'ai obtenus soit avec des tuyères en matières isolantes, soit avec des tuyères en métal, semblent montrer que *la substance de la paroi ne doit pas intervenir*.

Pour être fixé sur le degré d'acidité réelle des solutions que j'ai expérimentées, j'ai mesuré leur *pH*. J'ai employé la méthode colorimétrique(*) dont la précision m'a paru bien suffisante. J'ai obtenu,

pour la solution de SO^4Cu	4,5
pour la solution de NaCl	4,5
pour la solution de NaOH	9,—

Les deux premières sont nettement acides, comme l'indique le tournesol, elles ont le même *pH*, mais elles donnent des résultats différents quant à la valeur de la différence de potentiel, l'acidité ne semblant intervenir que pour le sens de cette différence de potentiel.

4) Valeur de la force électromotrice.

On peut représenter schématiquement, comme ci-contre, la tuyère par un tube étranglé *t*, et les deux électrodes A et B entre lesquelles se mesure la différence de potentiel. La flèche indique le sens de l'écoulement de la vapeur. L'électrode A est à l'aval, elle représente la plaque sur laquelle vient frapper le courant de vapeur avant de passer dans le col de la tuyère, elle est normalement reliée électriquement à la tuyère. Cette dernière est généralement, — dans les expériences que j'ai décrites au chapitre I, — fixée sur un tuyau métallique branché sur la chaudière, mais elle peut être isolée, comme les tubes de verre de mes premiers essais, ou reliée à la canalisation d'arrivée de vapeur par une partie de tube isolant. L'électrode B est à l'amont, elle reçoit le jet de vapeur électrisé, elle est toujours soigneu-

(*) Qui donne une décimale exacte.

sement isolée de la tuyère. Elle est constituée d'une grille à large maille pour laisser la vapeur s'écouler librement.

L'expérience montre qu'entre les 2 électrodes il se produit une

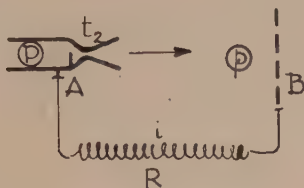


fig. 10.

force électromotrice E et que si on les relie extérieurement par un conducteur de résistance R il passe un courant i tel que :

$$iR = E$$

Le régime permanent d'écoulement étant établi, le fluide remplit tout l'espace compris entre les 2 électrodes. Comme on l'a vu ce fluide est un mélange de vapeur et de liquide, probablement assez homogène par suite du brassage des gouttes du liquide dans le mouvement tourbillonnaire.

Si le liquide est de l'eau, aussi pure que possible, la résistance de la colonne de fluide comprise entre les électrodes est très grande, de l'ordre de plusieurs mégohms. Le fluide est, au point de vue électrique, dans la catégorie des « isolants » et l'on a une machine à très grande résistance intérieure du type *électrostatique*.

J'ai indiqué qu'il y a, dès la sortie du col de la tuyère une vaporisation instantanée des gouttes.

Ce phénomène se produit à très petite distance du col. On peut, en effet, se rendre compte, par le calcul, que la vitesse augmente très rapidement, après la section minimum, en fonction de la section; c'est ainsi que, pour une augmentation de section de 1 %, l'augmentation de vitesse dépasse 12 % (1). Pour une de mes tuyères, par exemple,

(1) Le calcul se fait par la relation (1), dans laquelle on introduit la valeur de V_c , célérité du son, et en tenant compte de (4).

dont l'angle de divergence est de 15° et dont la section au col est de $1,75 \text{ mm}^2$, une augmentation de section de $0,02 \text{ mm}^2$ donnera une section située, suivant l'axe, à moins de $0,04 \text{ mm}$. de la section minimum. A cet endroit, en supposant la vitesse au col de 400 m/s , elle sera passée à 460 m/s . Cette subite mise en vitesse, qui correspond à une accélération de plus de $1 \times 10^7 \text{ m/s}^2$, donne au phénomène une telle allure qu'il ne faut pas considérer la vaporisation d'une seule goutte, mais l'explosion de tout le jet, parfaitement homogène, d'où il résulte une *variation brusque de la densité* du fluide.

C'est à ce moment que sont libérées les charges électriques, et, quel que soit le mode de cette libération, on constate leur existence.

Les particules électrisées positivement, par exemple, sont alors entraînées par le jet, mais l'attraction de la paroi, qui prend la charge de signe contraire, en retient une couche mince, mais finie, ce qui explique la répartition des potentiels que j'ai observé : gradient très élevé aux abords immédiats de la paroi.

J'ai trouvé expérimentalement que la force électromotrice, mesurée par la différence de potentiel entre la paroi et le jet, est proportionnelle à la différence de pression ($P_c - p$). Les considérations précédentes rendent compte que ces deux grandeurs E et ($P_c - p$) varient bien dans le même sens. En effet, l'accélération de la vitesse, à la sortie du col, dépend de cette différence de pression, et cette accélération coïncide avec la vaporisation instantanée des gouttes d'eau.

Dans la théorie électronique de la constitution de la matière, on peut penser que l'état électrique de la molécule d'eau change quand cette eau passe de l'état liquide à l'état gazeux, ou inversement. Elle peut, par exemple, perdre ou gagner, quelques électrons; en sorte qu'il pourrait y avoir gain ou perte d'énergie électrique potentielle dans la vaporisation et inversement dans la condensation.

Quoi qu'il en soit, les différents facteurs qui interviennent pour modifier la force électro-motrice, sont les mêmes que ceux qui modifient la tension superficielle des gouttes de liquide entraînées par la vapeur.

En dehors de la pression ou de la température, de la résistivité (ou de la conductivité), il doit donc bien intervenir également la *viscosité*. Cette propriété doit manifestement agir pour diminuer la force électromotrice — de même que la vitesse des ions, dans une solution diluée, varie en raison inverse de la viscosité.

Par contre, la force électromotrice sera d'autant plus élevée que le *pouvoir diélectrique* sera plus grand. Ce dernier varie, en effet, proportionnellement à la pression.

Enfin, il semble bien que l'on doive tenir compte de la *différence de potentiel au contact* du fluide et de la paroi, non par sa valeur, qui est toujours très faible, mais par le sens qu'elle donne à la force électromotrice comme cela résulte de l'étude de J. Perrin.

On arrive ainsi, en désignant par Δp la différence ($P_c - p$), k le pouvoir diélectrique, ε la différence de potentiel au contact, ϱ la résistivité, et μ le coefficient de viscosité, à la relation :

$$\frac{E}{\Delta p} = k \varepsilon \frac{\varrho}{\mu} = C^{\text{te}}$$

Cette relation est homogène.

Ainsi établie, elle confirme qu'en interprétant les faits expérimentaux, notamment que le phénomène électrique se joue tout près de la paroi, la force électromotrice produite dépend, pour un tube donné, de la constante diélectrique, de la d.d.p. au contact de la paroi et du liquide, de la résistivité et de la viscosité du liquide entraînée par la vapeur.

Le mouvement du fluide, c'est-à-dire l'écoulement de vapeur, qui assure le transport des charges électriques intervient par la chute de pression qui correspond à un travail bien déterminé de la vapeur.

La perte de charge dépend du régime d'écoulement. Dès que la vitesse atteint la vitesse du son dans le fluide, mélange de vapeur et de liquide, la perte de charge subit une brusque augmentation à laquelle correspond la variation rapide — ce que j'ai appelé l'amorçage — de la force électromotrice, pour une très faible augmentation de la vitesse.

Je me suis demandé à quelle valeur approximative du nombre de Reynold se fait le changement de régime. On peut estimer(*) que c'est la viscosité du liquide seul qui intervient, bien que le mélange de vapeur et de liquide sous forme de gouttelettes très divisées, soit pro-

(*) Dans une première approximation.

bablement assez homogène. On a alors, pour la tuyère dont les résultats d'essai sont mentionnés ci-dessus au tableau B :

$$\frac{Vd}{\nu} = \frac{400.10^2 \times 0,2}{0,0028} = 3.10^6$$

J'ai pris pour la valeur de la viscosité cinématique ν celle de l'eau à 100° C., cette valeur doit être trop faible (celle de la vapeur saturante à la même température est 0,225) et le nombre trouvé est trop grand. On peut estimer qu'il est de l'ordre de 10^5 .

On peut, d'autre part, avoir l'ordre de grandeur des résultats obtenus par l'application de la formule donnant la valeur de E en fonction de la chute de pression.

Pour ce calcul numérique j'exprimerai toutes les quantités en unités C.G.S. électrostatiques sauf les différences de potentiel qui se trouvent dans les deux membres et que je continuerai à exprimer en volts.

La résistivité ρ est évaluée en ohms par centimètre. Sa valeur en unités C.G.S. s'obtient en divisant les nombres par 9.10^{11} .

Pour l'eau seule (qui n'est pas pure), que j'utilise, je n'ai aucune valeur de la différence de potentiel au contact eau/cuivre. Je sais toutefois que cette valeur est très faible; je prends comme valeur approximative 0,001 volt.

La constante diélectrique de la vapeur d'eau à 145° est $k = 1,007$ (Recueil des constantes numériques), celle de l'eau est $k = 80$, on peut donc prendre comme valeur approchée de la constante diélectrique du mélange d'eau et de vapeur $k = 10$.

L'application de la formule donne donc, pour une chute de pression de 1000 g/cm², soit environ 10^6 C.G.S. et en prenant pour résistivité la valeur trouvée précédemment.

$$\frac{10 \times 10^{-3} \times 24.10^9}{225.10^{-3} \times 9.10^{11}} \times 10^6 = 10^3$$

Le résultat est bien de l'ordre de grandeur de celui trouvé dans les mesures.

Il ne paraît pas étonnant de constater que la relation doive être complétée par un coefficient A qui dépendrait de la forme et des dimensions du tube d'écoulement et l'on aurait, plus exactement :

$$\frac{E}{\Delta p} = A \cdot k \varepsilon \frac{\rho}{\mu} \quad (5)$$

Le coefficient numérique A peut se déterminer par l'expérience en faisant passer dans la tuyère de la vapeur entraînant des gouttelettes d'un liquide dont on connaît préalablement les différentes constantes k , ε , ρ et μ , et en mesurant E et Δp . Dans l'exemple que j'ai pris ci-dessus, pour l'eau seule on trouve pour le coefficient A, et pour la tuyère ayant servi aux essais du tableau B, la valeur d'environ 4.

Si on fait le même calcul pour un liquide de résistivité plus faible que l'eau, traversant la tuyère sous forme de gouttelettes très divisées, comme je l'ai fait pour une solution très diluée de sulfate de cuivre, on arrive, pour la tuyère qui n'est pas la même que la précédente, à une valeur pour A très notablement plus élevée.

Je n'ai pas fait d'expériences précises permettant de déterminer plus exactement ce coefficient pour les tuyères que j'ai utilisées, m'étant surtout attaché à étudier qualificativement le phénomène observé.

On peut concevoir l'effet du pouvoir diélectrique du fluide. Je considère le condensateur formé par les deux électrodes fixes et le fluide en mouvement, regardé comme isolant; on sait que, si on fait varier le volume spécifique du fluide, la capacité du condensateur est modifiée. Inversement, si on établit un champ électrique entre les deux armatures, le volume spécifique varie dans cet espace.

Ce phénomène se produit aussi bien pour les gaz que pour les liquides, et par conséquent pour un mélange de vapeur et de liquide. Il a été étudié par Helmholtz et par Lippmann, à la suite d'une expérience de Boltzmann sur la variation de la constante diélectrique des gaz avec la pression. Dès que le champ est établi, le fluide se contracte entre les armatures; réciproquement si on augmente la pression du fluide, on constate que le potentiel diminue ce qui implique que la capacité du condensateur a augmenté.

Si k est le pouvoir diélectrique du fluide, tout se passe comme si la distance entre les deux électrodes était devenue k fois plus petite. L'augmentation de la pression a donc pour effet de rendre la capacité

du condensateur k fois plus grande. De nombreuses expériences ont été faites qui ont montré que, pour un fluide donné, k *varie proportionnellement à la pression*. On écrit :

$$k = 1 + \beta p$$

β est une constante spécifique du fluide.

Lippmann a établi la loi de variation du volume Δv du fluide renfermé dans l'espace compris entre les deux électrodes lorsqu'on élève le potentiel de l'un d'eux de ΔE ; en exprimant d'une part le principe de la conservation de l'électricité, d'autre part le principe de l'équivalence, il obtient un système de deux équations qui s'interprète par la loi physique du phénomène observé.

La diminution de volume — Δv est

$$-\Delta v = A. \overline{\Delta E. c_0} \beta$$

On voit que la variation de volume est proportionnelle à la capacité c_0 , à la constante β particulière au fluide et au carré de la différence de potentiel entre les deux électrodes.

Cette expression est indépendante de la forme du condensateur.

L'application de cette formule donne, pour des tensions élevées une contraction très petite. Lippmann (1) a calculé que la variation de volume de chaque unité de volume que subit l'air, quand il est soumis à une différence de potentiel de 40.000 volts entre deux plateaux séparés de l'unité de longueur et sous la pression atmosphérique de 760 mm. de mercure, est de

$$-\frac{\Delta v}{v_0} = 0.000.000.38 = 38.10^{-8}$$

v_0 est le volume initial.

La diminution relative de volume des fluides autres que l'air peut se déduire de celle-ci en remarquant que les variations de volume sont entre eux comme les valeurs de β .

On a donc, pour l'eau :

$$\frac{\Delta v}{v_0} = 38.10^{-8} \frac{79.10^{-6}}{54.10^{-11}} = 55.10^{-3}$$

(1) Lippmann, *Unités électriques absolues*, 1899, p. 208.

Cette valeur est assez faible relativement à la tension élevée nécessaire pour l'obtenir. Si le phénomène est réversible, on conçoit que la moindre variation dans le volume d'une couche de fluide donne une grande variation de potentiel.

Les variations du volume du fluide, dont j'ai analysées ci-dessus les effets, se produisent à la sortie même de la tuyère. Elles peuvent être très rapides si on admet l'*éclatement* des gouttes par vaporisation instantanée. Si on considère une seule goutte, le rapport de sa surface à son volume varie beaucoup à ce moment; il en est de même de sa tension superficielle qui en dépend.

CHAPITRE III

Fonctionnement caractéristique d'un tube dans lequel on fait le vide et où s'échappe la vapeur d'eau

D'après ce qui précède, le fluide s'échappant de la tuyère, où se produit le phénomène électrique, est constitué par de la vapeur contenant en suspension de nombreuses gouttelettes liquides dont la composition intervient d'une façon importante, autant pour fixer la valeur de la force électromotrice que pour en déterminer le sens.

D'autre part, les expériences que j'ai décrites montrent l'effet d'une grille polarisée, formant écran, interposée dans le jet de vapeur.

Si le fluide s'échappe dans un tube, en matière isolante, assez large pour ne pas gêner son expansion, l'espace ionisé est limité à l'enceinte du tube. Les phénomènes observés sont alors les mêmes mais très amplifiés. Il est alors possible de créer dans le tube une dépression en le faisant communiquer à un condenseur où règne seulement la pression de vapeur correspondant à la température de l'eau de refroidissement, ou en extrayant l'air et la vapeur détendue au moyen d'une pompe à vide.

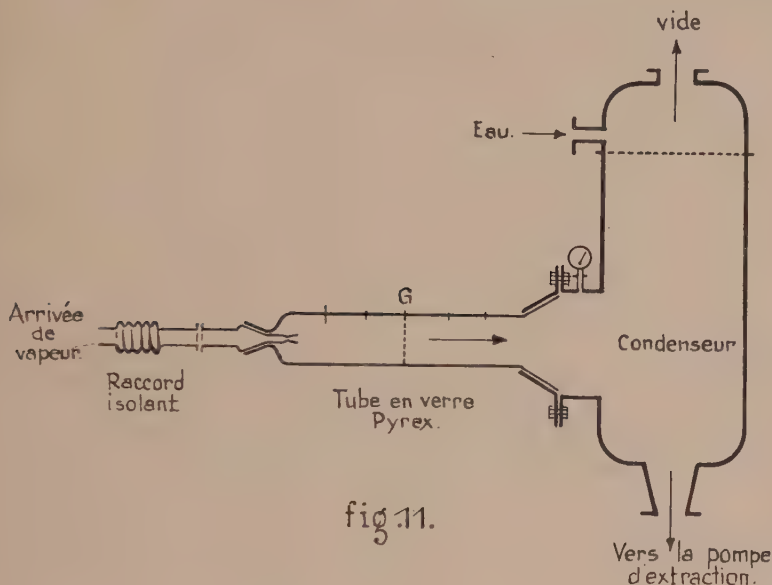
L'appareil d'essai dont je me suis servi, comprenait un tube en verre pyrex cylindrique de 70 mm. de diamètre intérieur et de 500 mm. de longueur (fig. 11). Il était terminé aux extrémités par deux tubulures, l'une étroite était emmanchée par un raccord conique sur la tuyère, l'autre élargie était emmanchée par un raccord, également conique, sur la buse d'un condenseur.

Ce dernier était à mélange et une circulation d'eau froide tombant en pluie de la partie supérieure assurait la condensation de la vapeur. Une pompe maintenait dans le condenseur une pression très basse, elle extrayait constamment le mélange d'eau et de vapeur condensée et, en même temps l'air se trouvant dissout dans l'eau froide et se dégageant par suite de la raréfaction.

La température dans le condenseur atteignait 25°, à cette température la tension de la vapeur d'eau est d'environ 0,04 kg./cm². La pression de l'air qui se dégage de l'eau est à peu près égale à celle de

la vapeur, de sorte que la pression totale était de $0,08 \text{ kg./cm}^2$; elle était dans le tube d'environ $0,10 \text{ kg./cm}^2$, soit 100 g./cm^2 correspondant à un vide, mesuré au manomètre, de 66 cm. de mercure.

La canalisation d'arrivée de vapeur à la tuyère était isolée électriquement de la chaudière au moyen d'un raccord en stéatite, le condenseur communiquait avec le sol.



À l'intérieur du tube isolant, était installée une grille G constituée par une couronne mince épousant exactement la forme cylindrique du tube, dans laquelle on avait tendu des fils fins de maillechort. Le collecteur de charge était constitué par le condenseur; ainsi, dans ce montage, les charges se perdaient normalement au sol.

La paroi du tube était traversée, le long d'une de ses génératrices, par cinq connexions métalliques faites en fil de tungstène de 1 mm. de diamètre soudé dans le verre et permettant de prendre la tension en ces différents points. La grille G était reliée à l'une de ces prises.

La présence de la grille, bien isolée au milieu du tube, ne modifie pas pratiquement la distribution du potentiel; la grille se charge au même potentiel que le jet de vapeur et la mesure à l'électromètre donne la même valeur entre tuyère-condenseur et tuyère-grille. La position de la

grille à l'intérieur du tube est indifférente. On peut donc admettre que la colonne du fluide remplissant le tube en action est sensiblement au même potentiel.

Pour préciser les polarités, l'écoulement de la vapeur d'eau suffisamment pure, donnant un jet positif et la tuyère étant toujours de polarité contraire, j'appellerai cette dernière « cathode » le conducteur captant les charges du jet étant l'« anode ». La répartition du potentiel, dans le tube est représentée par la fig. 12. A la cathode le gradient de potentiel est très élevé; à une très petite distance de la paroi de la

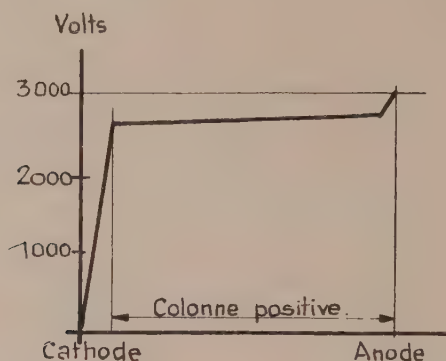


fig. 12.

tuyère, la différence de potentiel a presque atteint son maximum. Dans la colonne positive la différence de potentiel varie très peu. A l'anode une légère montée doit exister, bien qu'elle soit difficilement mesurable.

Le champ électrique, à l'intérieur du tube n'est donc pas constant.

L'expérience montre aussi que la répartition du potentiel est entièrement modifiée si l'on polarise la grille, comme je l'ai indiqué précédemment. Une grille négative repousse une partie des charges émises par la tuyère, une grille positive les attire.

Si l'on réalise le schéma de la figure 13, tout à fait semblable à celui déjà indiqué, d'un tube à 3 électrodes on a le fonctionnement caractéristique suivant :

La grille étant reliée au pôle positif d'une batterie de piles d'un grand nombre d'éléments, dont le pôle négatif est réuni à la tuyère (cathode), et l'anode étant reliée au pôle positif d'une génératrice à

courant continu, dont le pôle négatif est également réuni à la cathode, si on fait varier la différence de potentiel appliquée à la grille, le courant qui traverse le tube varie dans le même sens.

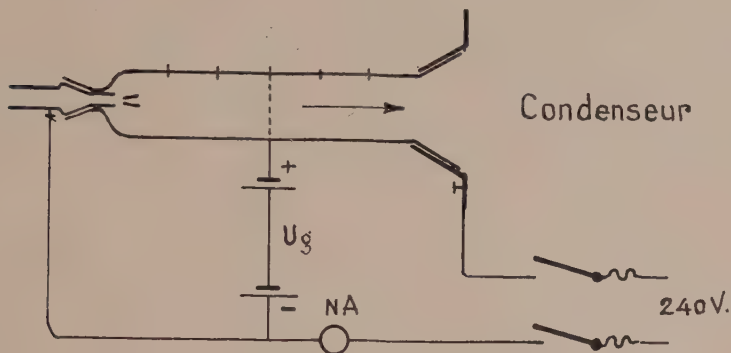


fig 13.

Le courant, très faible, est mesuré avec un microampèremètre permettant d'apprécier $0,1 \mu\text{A}$.

Pour faire l'essai il faut obtenir préalablement un régime bien stable ;

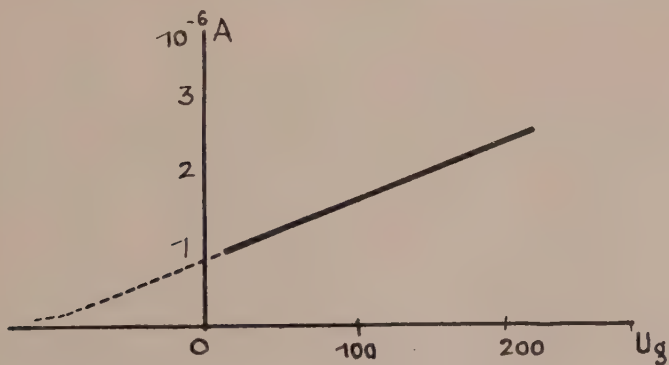


fig 14.

la pression ne doit pas varier tant au vide qu'à l'admission et la vapeur doit contenir toujours la même quantité de liquide. Ces conditions étaient difficiles à réaliser avec le matériel dont je disposais et

je n'ai pu qu'observer l'allure du phénomène sans pouvoir faire des mesures très précises.

La courbe représentant les variations du courant en fonction de la « tension-grille » serait d'après celà, celle de la figure 14. Je l'ai prolongée, en pointillés dans la région des tensions-grille négatives.

Si on augmente la pression d'admission, l'intensité du courant augmente et l'on a une courbe plus élevée. Il est probable qu'on obtiendrait le même résultat en augmentant la tension appliquée à l'anode.

Un accroissement de la pression correspondant à un accroissement de la température c'est-à-dire de l'énergie interne de la vapeur, il est intéressant de constater l'augmentation corrélative du courant.

Il semble bien ainsi que *le tube dans lequel s'échappe la vapeur électrisée par son passage dans la tuyère, ait un fonctionnement semblable à un tube contenant un gaz à travers lequel on fait passer un courant en appliquant une différence de potentiel aux électrodes.* Il y a cependant la différence essentielle que le courant est créé dans le tube lui-même.

Des essais dans ce sens doivent être poursuivis.

Pour préciser ce qui peut se passer dans le tube je vais rappeler comment, d'après les théories actuelles, on peut concevoir le fonctionnement d'un tube thermoionique, c'est-à-dire contenant un gaz plus ou moins raréfié, — et la différence qu'il y a avec l'émission électronique dans un tube à vide très poussé.

On sait qu'on distingue la conductibilité électrolytique de la conductibilité métallique. La première est due au transport de charges positives et négatives par des ions. La conductibilité métallique est due au déplacement d'électrons, c'est-à-dire de charges négatives, le flux d'électrons circulant en sens inverse de celui adopté pour le courant électrodynamique.

Il existe aussi la conductibilité gazeuse qui est celle des gaz et des vapeurs; elle participe à la fois de la conductibilité métallique et de la conductibilité électrolytique. Les gaz ou les vapeurs sont à l'état normal mauvais conducteurs de l'électricité. Ils ne deviennent conducteurs que sous l'action de certains agents physiques (rayons X, ultra-violets....) Comme pour la conductibilité électrolytique, les charges négatives et positives sont séparées et se déplacent sous l'action du champ électrique, les charges négatives vont vers l'anode et les courant. C'est ce que l'on appelle l'ionisation.

Dans les tubes où le vide est très poussé, c'est-à-dire où l'atmosphère intérieure est aussi raréfiée que le permet la technique la plus perfectionnée (un millionième de millimètre de mercure) le transport d'électricité ne peut être expliqué que par un déplacement d'électrons. Les corps formant la cathode émettent des électrons, on a une émission *électronique*. C'est à tort que pareils tubes sont appelés « thermoioniques », il faut réserver cette désignation aux tubes à gaz où le courant s'établit par suite de l'ionisation par chocs des molécules. Pour ces derniers il faut une tension minimum nécessaire pour l'ionisation — 16 volts pour l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote, 10 volts pour la vapeur de mercure. — Une fois que cette tension est atteinte le courant, c'est-à-dire le flux des ions, se crée lui-même sa propre conductibilité.

Le fluide qui s'écoule dans le tube de mes expériences peut être considéré comme un mélange homogène ayant une conductibilité gazeuse. Par suite de l'écoulement de la vapeur, dans certaines conditions, le fluide est ionisé. C'est un fait d'expérience, il existe une différence de potentiel entre les deux électrodes dont l'une est la tuyère (cathode). Les charges négatives se déplacent vers l'anode et les charges positives vers la cathode. Dans toutes sections de passage, entre les électrodes, il y a autant de charges qui entrent d'un côté que de charges qui sortent de l'autre; *il n'y a pas de charge d'espace*.

Si on considère maintenant la région immédiatement en contact avec la cathode, les ions positifs, vers la cathode, ne trouvent pas d'ions négatifs : il en résulte une charge positive.

La même chose doit se produire à l'anode.

Ces accumulations de charges à la cathode et à l'anode ont pour effet de renforcer le champ électrique dans ces régions aux dépens de celui qui existe dans l'espace intermédiaire.

Les considérations ci-dessus expliquent parfaitement les résultats de mes expériences concernant *l'état électrique de l'atmosphère où se fait l'écoulement de la vapeur*. La grande augmentation de potentiel au voisinage immédiat de la cathode joue un rôle principal. Elle est en accord avec les idées d'Helmholtz concernant la couche double formée à la surface de séparation du fluide et de la paroi.

On a une répartition absolument semblable dans un tube rempli de gaz à basse pression auquel on applique une différence de potentiel supérieure à la tension d'ionisation du fluide. Dès qu'il y a amorçage il se produit une « chute » à la cathode, chute qui correspond sensiblement à la tension d'ionisation.

Cette différence de potentiel est de quelques centaines de volts pour un tube à décharge à *cathode froide*. Elle varie dans le même sens que la différence de pression, qui crée l'écoulement, dans le tube à vapeur, et elle peut atteindre des valeurs très élevées.

Le potentiel d'ionisation d'un fluide est intimement lié à sa conductibilité. Le potentiel est d'autant plus élevé que le fluide est moins conducteur. Or les expériences dans lesquelles j'ai fait passer dans la vapeur des gouttelettes de solutions salines ont montré que la différence de potentiel obtenu — par l'écoulement de la vapeur dans la tuyère — était également en raison inverse de la conductivité. Il semble donc qu'il puisse y avoir un rapport entre cette différence de potentiel et le potentiel d'ionisation du fluide considéré.

Il y a une grande analogie entre la dissociation d'un électrolyte et l'ionisation d'un gaz. On retrouve cette analogie dans l'hypothèse de Van't Hoff qui assimile complètement une solution diluée à un gaz parfait.

Il est remarquable que Nernst, en admettant l'analogie entre la détente de P , pression de dissolution du métal, à p , pression osmotique de la solution, et la détente d'un gaz, ait pu établir une formule donnant la force électromotrice d'une pile :

$$e = \frac{RT}{nF} \log_e \frac{P}{p}$$

R se rapporte à un ion-gramme,

F est la quantité d'électricité qui dépose un atome-gramme d'un métal monovalent, il est égal à 96.500 coulombs (1)

Ne peut-on pas pousser l'analogie plus loin?

Au lieu d'une seule tuyère à l'extrémité du tuyau d'admission, on peut mettre une plaque, en laiton par exemple, perforée d'un grand nombre de trous identiques présentant le profil étranglé des tuyères expérimentées. Une plaque ainsi constituée avec un grand nombre de canaux forés dans son épaisseur n'est-elle pas assimilable à une paroi poreuse séparant deux milieux homogènes?

(1) Darmois, *Conductibilité des électrolytes*, p. 75 (loc. cit.).

Or l'on sait que le passage d'un fluide à travers une telle paroi, fait naître une force électromotrice (1).

Pour déduire la valeur de cette force électromotrice suivant une formule analogue à celle de Nernst — (qui s'établit en écrivant que le travail correspondant à la détente d'une molécule-gramme, détente supposée isotherme et effectuée d'une façon réversible, est égal au travail électrique maximum qE que l'on peut obtenir dans la transformation) — il faudrait connaître la *quantité d'électricité q qui condense l'unité de masse du fluide.*

La condensation est en effet le phénomène inverse de la vaporisation instantanée.

Les valeurs à prendre pour les pressions seraient la pression critique P_c et la pression d'échappement p . Le travail correspondant à la chute de pression de la pression d'admission P à la pression P_c , obtenue au col de la tuyère, serait un travail en quelque sorte préparatoire et inutilisé. On aurait une forme semblable à

$$RT \log_e \frac{P_c}{p} - T = qE$$

Le premier terme du premier membre est de beaucoup le plus important.

La quantité q , *équivalent électrique* de la quantité de chaleur dégagée par la condensation d'un gramme du fluide, serait à déterminer par l'expérience.

Que se passe-t-il dans le tube recevant le jet dans un espace raréfié en communication avec un condenseur? Il y règne une « basse pression » qui est celle que l'on peut obtenir industriellement dans un condenseur et qui peut atteindre un vide de 95 % (condenseur à surface, eau à 15°) qui correspond à 30 mm. de mercure pour une pression atmosphérique de 760 mm.

Au delà du col de la tuyère, les gouttelettes liquides entraînées, « tombant dans le vide » se vaporisent instantanément, *elles éclatent*, comme je l'ai indiqué plus haut, puis le fluide pénètre dans le tube.

Dans mes expériences ce tube (en verre pyrex) n'était pas recouvert,

(1) J'ai rappelé déjà ci-dessus l'analogie que présentent les résultats que j'ai obtenus quant au sens de la force électromotrice avec ceux trouvés par J. Perrin pour l'osmose électrique.

car je tenais à voir ce qui se passait à l'intérieur; mais il y aurait intérêt à le calorifuger pour éviter toute déperdition de chaleur avant le condenseur. L'enceinte du tube, où se trouve la grille, collecteur des charges électriques produites, serait ainsi parfaitement isolée, tant calorifiquement qu'électriquement. Le fluide *déchargé* s'écoulerait ensuite dans le condenseur.

Pour préciser le mécanisme de la décharge du fluide électrisé par la grille, je rappellerai le fonctionnement d'un tube « thermoionique » auquel j'ai assimilé le tube dans lequel s'échappe le fluide.

Je considère le tube sous sa forme classique la plus simple : on chauffe un filament à une température assez élevée pour avoir une émission électronique, en face du filament est disposée l'électrode réceptrice à laquelle on applique un potentiel négatif (du même signe que les charges émises) U par rapport au filament.

Tous les électrons dont la vitesse initiale, exprimée en volts, est supérieure à U pourront atteindre l'électrode. Il y en aura d'autant moins que la tension *opposée* U sera plus grande. La courbe qui représente le courant a une forte pente rectiligne dans toute la partie correspondante à la tension négative, ce courant est *positif* bien que très faible (de l'ordre du microampère). De l'énergie est donc cédée à la source donnant la différence de potentiel et l'on peut charger un accumulateur. Cette énergie provient directement de l'agitation thermique des électrons. On se trouve en présence d'une *transformation directe de la chaleur en énergie électrique*.

Des courant aussi faibles sont inappréciables et pratiquement nuls, on en déduit qu'on peut toujours annuler le courant d'une électrode froide en appliquant à celle-ci une faible tension négative. Mais ce n'est pas le cas si l'on s'attache précisément à obtenir une émission électronique, ou ionique, suffisamment abondante pour que les courants soient plus intenses.

Si la tuyère débouchant dans le tube est remplacée par un nombre n de tuyères, — comme je l'ai indiqué ci-dessus, — produisant chacune, pour la même chute de pression, la même force électromotrice, *la quantité d'électricité émise sera n fois plus grande*. La consommation de vapeur augmentera dans la même proportion.

Armstrong a obtenu un courant capable de décomposer l'eau et d'autres substances, en utilisant 46 *jets*. La vapeur s'échappait dans l'atmosphère et les charges étaient recueillies simplement par une

« rangée de pointes métalliques ». Les voltamètres étaient intercalés entre les pointes et la chaudière, la rangée de pointes métalliques constituant le collecteur d'électricité positive. D'après les indications qu'il donne sur la durée du passage du courant et la quantité approximative d'hydrogène libéré (1 heure 15 minutes et 1 pouce cube) on peut déduire que l'intensité du courant débité a atteint environ 0,03 A (30 mmA). (*)

Etant donné le rendement très mauvais d'une pareille installation, on peut se rendre compte que la quantité d'électricité réellement émise a été bien plus considérable.

Dans le tube dont je viens d'envisager le fonctionnement il paraît possible de « canaliser » la grande partie des charges émises — et qui se renouvellent continuellement. — *La résistance intérieure*, qui est très grande dans les expériences d'Armstrong, ce qui affecte beaucoup le rendement, peut être ramenée à une valeur moins élevée et même faible en utilisant un liquide plus conducteur. La substance entraînée par la vapeur a une grande influence. Des essais devraient être faits notamment avec du mercure, circulant en circuit fermé; la vaporisation *instantanée* d'une goutte de mercure doit produire un grand « dégagement d'électricité » pour employer le langage de Faraday et qui ne présume rien sur les causes de ce déplacement des charges électriques, comme le fait la conception électronique actuelle.

(*) En effet le volume d'un pouce-cube étant d'environ 16 cm^3 , le poids d'un pouce-cube d'air à la pression atmosphérique est de $1,293 \times 16 \times 10^{-3} = 21.10^{-3} \text{ g}$. L'hydrogène étant 14,5 fois plus léger, le poids du pouce-cube d'hydrogène est $1,45.10^{-3} \text{ g}$. La quantité d'électricité nécessaire pour libérer cette quantité d'H. est

de : $\frac{1,45.10^{-3}}{104.10^{-7}} = 140 \text{ coulombs}$, soit une intensité de $\frac{140}{4500} = 0,03 \text{ A}$

CHAPITRE IV

Interprétation thermodynamique des résultats
expérimentaux.

L'expérience montre qu'il est nécessaire que la vapeur du jet contienne du liquide en gouttelettes, pour obtenir une force électromotrice.

L'état d'humidité de la vapeur, et par suite son titre x a donc une influence importante sur le phénomène. J'ai indiqué précédemment que la détente dans le col d'une tuyère — ou dans une partie étranglée d'un tube — peut être considérée comme adiabatique. Si, comme je l'ai envisagé, l'enceinte dans laquelle s'échappe la vapeur est soigneusement calorifugée, la détente peut encore être considérée comme adiabatique, tout au moins jusqu'à une petite distance du col, à la sortie immédiate de la tuyère.

Je considère alors le cycle complet parcouru par le fluide : l'eau introduite dans la chaudière à la température absolue T_0 y est chauffée jusqu'à la température T_1 de sa vaporisation, correspondant à la pression P maintenue dans la chaudière; elle est ensuite vaporisée isothermiquement à cette température et la vapeur est détendue adiabatiquement jusqu'à la pression p , à laquelle correspond la température T_0 ; elle est alors condensée isothermiquement à cette température et de nouveau introduite dans la chaudière.

Le fluide accomplit donc ainsi un cycle fermé de transformations semblable à celui qui s'effectue dans une machine à vapeur. On peut y appliquer la loi de Clausius :

$$\text{Entropie} = \int \frac{dQ}{T} = 0$$

l'intégrale étant prise suivant le cycle fermé et T étant la température du fluide, et non celle des sources avec lesquelles il est en contact,

dans les transformations qui ne sont pas réversibles (chauffage de l'eau dans la chaudière).

Je rappelle comment on peut calculer la variation du titre x pendant la détente adiabatique, en appliquant la formule précédente; dans le cas de la vapeur saturée humide, la valeur de l'entropie est, en supposant que l'entropie est nulle pour $T = 273^\circ$:

$$\text{Entropie} = \log_e \frac{T}{273} + \frac{rx}{T}$$

On en déduit, en l'égalant à 0 :

$$\log_e T + \frac{rx}{T} = C^{\text{te}}$$

d'où :

$$\frac{dT}{T} + x d\left(\frac{r}{T}\right) + \frac{r}{T} dx = 0$$

$$\frac{dT}{T} + x \frac{dr}{T} - \frac{rxdT}{T^2} + r \frac{dx}{T} = 0$$

$$1 + x \frac{dr}{dT} - \frac{rx}{T} + r \frac{dx}{dT} = 0$$

En tenant compte que, pour l'eau, on a :

$$r = 606,5 - 0,695 t = 796 - 0,695 T$$

On obtient finalement :

$$\boxed{r \frac{dx}{dT} = 796 \frac{x}{T} - 1} \quad (1)$$

Puisque r est toujours positif, la dérivée $\frac{dx}{dT}$ est du signe du second membre, c'est-à-dire que le titre x croît ou décroît dans le même sens que T si le second membre est positif et, en sens inverse, si le second membre est négatif.

Ainsi, pour chaque valeur de T , il existe une *valeur critique* de x :

$$x_c = \frac{T}{796}$$

au-dessus de laquelle le titre x croît ou décroît dans le même sens que T et au-dessus de laquelle x varie en sens inverse de T .

On peut appliquer le raisonnement précédent à tout instant de la détente adiabatique, où la température est T en supposant que cette détente est arrêtée en ce point et le fluide condensé à cette température, puis réintroduit dans la chaudière. La relation (1) donne le sens de la variation du titre à ce moment.

En particulier, si, immédiatement au sortir du col le titre x est inférieur à la valeur critique x_c correspondant à la température T du fluide $\frac{dx}{dT}$ sera négatif et, la température diminuant, le titre augmentera. C'est-à-dire qu'il y aura *vaporisation d'une certaine quantité de l'eau contenue dans la vapeur*. C'est d'ailleurs le phénomène bien connu de la revaporisation pendant l'échappement dans le cylindre des machines à vapeur à piston.

Or, dans mes expériences, la pression absolue de la vapeur, à la sortie du col de la tuyère, qui est la pression critique, n'est jamais descendue au-dessous d'une valeur un peu supérieure à la pression atmosphérique, par exemple 1,3 kg./cm² environ, ni monté au-dessus de 5 kg./cm².

Pour ces deux valeurs extrêmes de la pression absolue de la vapeur saturée, les températures absolues correspondantes sont de 380° et 424°, auxquelles correspondent respectivement les valeurs 0,477 et 0,532 du titre critique.

Etant donné la nécessité d'opérer toujours avec de la vapeur très chargée de gouttelettes d'eau, c'est-à-dire à un titre très faible, il est très probable que la vapeur avait toujours, à la sortie du col, un titre inférieur à 0,477 et *a fortiori* à 0,532, car il suffit de bien peu d'eau pour que la proportion en poids de vapeur sèche soit inférieure à ces valeurs.

Dans ces conditions, *il y a bien vaporisation d'une partie de l'humidité de la vapeur à la sortie du bec d'échappement*, c'est-à-dire au début de la détente utile de la pression P_c à la pression p .

Ceci est conforme aux conclusions que nous avons déjà tirées de l'observation du phénomène.

Cette vaporisation augmente le titre de la vapeur, alors que la valeur critique de ce titre s'abaisse. Il arrive donc un moment où

le titre atteint la valeur critique correspondant à la température à laquelle se trouve la vapeur humide à ce moment.

A partir de ce moment, *si la détente continue à être adiabatique*, la température du fluide s'abaissant, le titre suit ce mouvement de décroissance, et il y a condensation de la vapeur.

Dans le cas où le jet s'échappe dans l'atmosphère, la détente ne peut être considérée comme adiabatique, que pendant très peu de temps et, alors, à cette condensation provenant de la détente elle-même, se superpose la condensation bien plus importante provenant du refroidissement de la vapeur par l'air ambiant.

Toutefois, la partie de la condensation due au refroidissement par l'air, n'a d'autre effet que de faire céder de la chaleur par le fluide à cet air; tandis que la partie de condensation due à la détente elle-même et qui n'est pas provoquée par un refroidissement, c'est-à-dire par une absorption de chaleur par un corps moins chaud, *pourrait fournir de l'énergie sous une autre forme*, puisque cette condensation a lieu aussi bien si le fluide n'est pas en contact avec une source froide qui peut lui soustraire de la chaleur.

Si, comme j'ai été amené à le penser, c'est la vaporisation brusque des gouttelettes d'eau qui produit la force électromotrice, la condensation, phénomène inverse, peut également en être la cause. Le sens seul changera. Et c'est bien un fait connu et démontré expérimentalement que la condensation de la vapeur est toujours accompagnée de l'existence d'électrons au sein de la vapeur. C'est ainsi, par exemple, qu'on explique le phénomène de sous-refroidissement : si de la vapeur sort d'une tuyère dans un espace « ionisé », par un dispositif émetteur d'électrons — substance radio-active (ou tout autre moyen), on peut obtenir, par détente, de la vapeur humide à des températures inférieures à celles qui correspondent aux pressions données par les tables de Regnault. Stodola a pu ainsi faire détendre de la vapeur d'eau jusqu'à la pression de 1,08 kg./cm² en obtenant la température de 90° au lieu de 101° (1).

Un apport d'électrons produit donc un sous-refroidissement, la vapeur se condense sur les électrons et forme un brouillard (effet Wilson), la

(1) Schweizerische Bauzeitung, 10 octobre 1914.

condensation est, en quelque sorte, *avancée*. Inversement la vaporisation sera *retardée* par la présence de charges électriques; l'application d'une tension élevée entre la tuyère et la grille du tube à basse pression — dans lequel se fait l'écoulement de la vapeur comme je l'ai indiqué précédemment — doit ainsi s'opposer à la vaporisation des gouttelettes comme s'il se produisait une contre-pression faisant résistance à l'écoulement.

Si, au contraire on extrait des électrons de la masse de vapeur on a un abaissement de pression sans abaissement de température.

Le jet de vapeur s'échappant, non plus dans l'atmosphère, mais dans un espace clos et calorifugé contenant le conducteur collecteur d'électricité positive (anode) et n'ayant qu'une issue juste suffisante pour l'évacuation, dans un condenseur ordinaire, du fluide (vapeur et eau) déchargé, il n'y a ainsi plus de refroidissement de ce fluide par l'air, avant que les charges électriques aient été recueillies. La condensation de la vapeur, à partir du moment où son titre serait réglé sur son titre critique, serait entièrement due à la détente adiabatique dans ce récipient calorifugé et la quantité d'énergie fournie sous forme électrique serait ainsi d'autant plus grande qu'il y aurait moins de déperdition de chaleur.

Le tube dans lequel se fait cette détente adiabatique doit être aussi complètement distinct que possible du condenseur.

Diagramme de fonctionnement.

Le fonctionnement thermodynamique d'une machine constituée par une chaudière, un tel tube *thermo-électrique* et un condenseur, s'effectue — comme je l'ai indiqué ci-dessus — suivant un cycle fermé semblable à celui d'une machine à vapeur. On peut le représenter, dans le diagramme entropique par le contour A B C E A (fig. 15).

Dans la réalité, la phase AB (introduction et chauffage de l'eau dans la chaudière de la température T_0 à la température T_1) et la phase BC (vaporisation isothermique à la température T_1) sont bien les mêmes, mais la détente n'est vraiment adiabatique que dans le col de la tuyère.

Cette courte détente adiabatique est représentée par CD, l'ordonnée

du point C étant la température T. et l'ordonnée du point D étant la température de la vapeur saturée à la pression critique P.

Si l'échappement a lieu dans l'atmosphère, comme dans les expériences d'Amstronng, de Faraday et dans mes premiers essais, le fluide entre en contact avec l'air ambiant dès sa sortie de l'orifice. La détente n'est plus adiabatique, à une courte distance de l'orifice elle est accompagnée de refroidissement, c'est-à-dire de cession de chaleur du fluide à la source froide. Elle est donc représentée par une courbe telle que DF, située à gauche de DE.

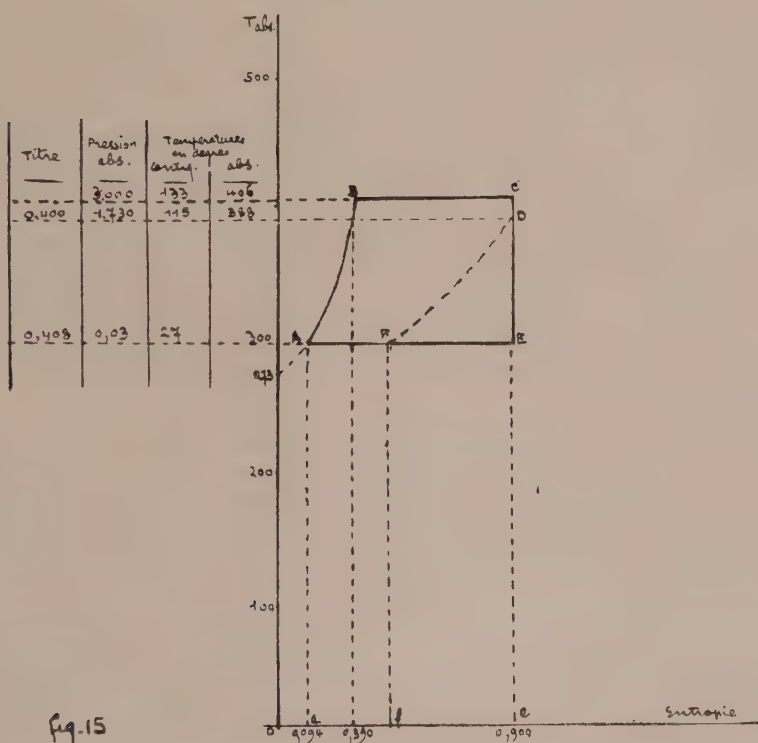


fig. 15

Cette détente s'arrête dès que la température du fluide est descendue à la valeur T de la température de la source froide. La courbe DF se termine donc en un point F sur l'isotherme AE correspondant à cette température.

Alors la condensation du fluide se fait complètement sans changement de la température T et le cycle se ferme en A .

L'aire $aABCea$ représente la chaleur fournie par la source chaude.

L'aire $BCDdB$ représente la chaleur transformée en énergie cinétique et en travail de frottement par la détente adiabatique dans le col de la tuyère

L'aire $fFDEef$ représente la chaleur cédée à la source froide pendant la détente *non adiabatique*.

L'aire $aAffa$ représente la chaleur cédée à la source froide pendant la condensation isothermique.

Enfin, l'aire $AdDFA$ représente la chaleur transformée, d'une part en travail mécanique pour vaincre la résistance de l'air, d'autre part, en énergie électrique, soit par le transport des charges positives d'un potentiel à un autre plus élevé, soit par la libération de charges accomplies pendant la détente du jet de vapeur humide.

Le travail mécanique sera d'autant plus faible que le vide sera plus poussé dans le tube. Cette aire qui représente ainsi, à peu de chose près, *l'énergie électrique utilisable* sera d'autant plus grande que le point F sera plus rapproché du point E , c'est-à-dire que l'on se rapprochera le plus de la détente adiabatique dans le tube.

La figure 15 est faite à l'échelle, avec les nombres relevés dans mes expériences avec écoulement de la vapeur dans l'atmosphère (tableau A, page 19) et les indications numériques qui y sont inscrites sont relatives à ces expériences, *dans l'hypothèse où le titre x est de 0,400 à la sortie du col* de la tuyère où la pression est de $1,730 \text{ kg./cm}^2$ correspondant à la température de 388° .

Dans le cas où la détente peut être considérée comme adiabatique, puisque le titre à la sortie du col (en D) est supposé être 0,400, inférieur par conséquent au titre critique 0,487 correspondant à la température de 388° , il y a vaporisation d'une partie de l'humidité, jusqu'à ce que la température du fluide soit descendue à la valeur de 326° à laquelle le titre est 0,410 égal au titre critique à cette température. Ensuite, il y a continuellement condensation jusqu'à la fin de la détente adiabatique (en F) où la température T est, par exemple 300° (27° C) et le titre de 0,408, encore supérieur au titre critique 0,377 à la même température de 300° .

Si, au contraire, le titre à la sortie du col était, par exemple, 0,600 supérieur par conséquent au titre critique 0,487 correspondant à la température de 388°, il y aurait condensation dès le début de la détente BE et pendant toute la durée de celle-ci. A la fin, le titre serait devenu 0,548 encore très supérieur au titre critique 0,377.

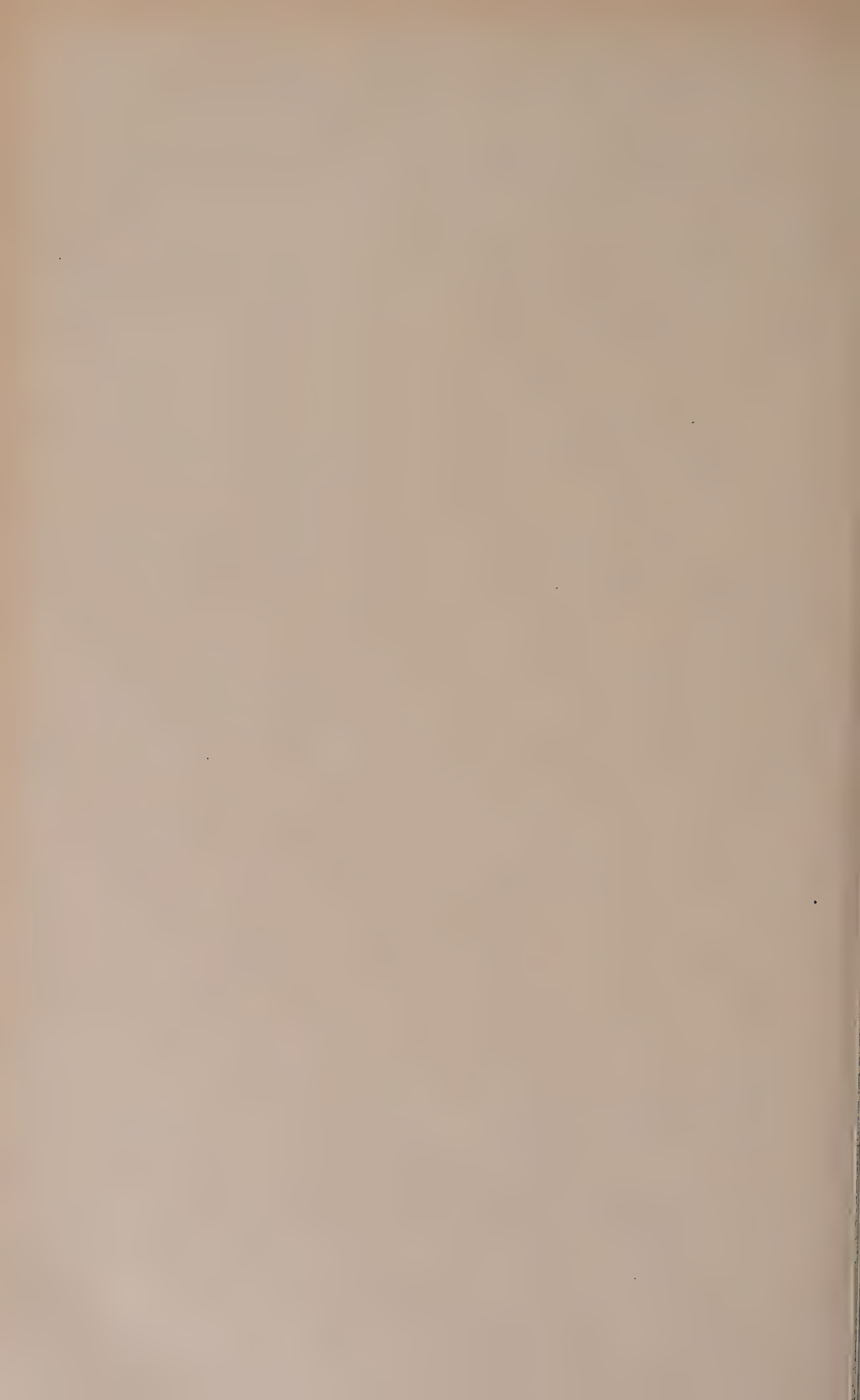
Avec une pression absolue d'amont plus élevée que 3 kg./cm², ces mêmes particularités de la variation du titre seraient beaucoup plus caractérisées.

Il n'y a pas cependant, croyons-nous, intérêt à augmenter par trop la pression d'admission. La perte de charge dans le col, de cette pression à la pression critique, augmente en effet en même temps que la pression d'admission et il faut s'efforcer surtout à obtenir un très bon vide.

On voit que le rendement, dans le cas de la détente adiabatique, est donné par le rapport

$$\frac{\text{aire AdBCDEA}}{\text{aire aABCEea}}$$

Ce rendement est comparable à celui d'une bonne machine à vapeur, car l'énergie perdue ne doit pas être supérieure aux pertes organiques d'une machine (ou turbine) de construction parfaite.



RÉSUMÉ

L'origine de mes recherches est une observation tout à fait fortuite que j'ai faite lors des essais d'une machine à vapeur, dans une usine de la région parisienne au mois de mars 1932.

Un tube de manomètre s'étant cassé, une fuite de vapeur se produisit par une fissure étroite et, à la grande surprise des personnes présentes on ne pouvait approcher une main du jet, l'autre touchant le manomètre, sans être désagréablement secoué.

Le jet de vapeur était en effet électrisé par son passage à travers la section étranglée de la fissure.

Armstrong, puis Faraday ont étudié ce phénomène. Faraday l'a attribué au frottement des gouttelettes de liquide entraînées par la vapeur. Armstrong a été moins affirmatif et il a pensé que la vaporisation devait aussi intervenir.

I. Dans une première série d'expériences, j'ai fait passer de la vapeur dans des tubes en verre de petits diamètres (0,5 à 1,5 mm.) et de différentes longueurs. Les tubes en essai communiquaient, d'une part avec une petite chaudière isolée, dont la pression effective pouvait varier de 0 à 5 kg./cm², d'autre part avec un réservoir où l'on pouvait maintenir une pression d'environ 0,3 kg./cm². J'ai utilisé des longueurs de 1 mètre, 50 centimètres et 20 centimètres. La différence de potentiel était mesurée, entre les deux extrémités des tubes au moyen d'un électromètre. J'ai constaté que, pour un tube donné, cette différence

de potentiel varie linéairement avec la pression d'admission, la pression d'échappement restant sensiblement constante. Elle atteint quelques dizaines de volts pour une différence de pression de quelques kilogs par centimètre-carré.

J'ai remplacé, en deuxième lieu, les tubes de verre par des tuyères convergentes de différentes formes mais se ramenant toutes à un tube de section étranglée, *de substance absolument quelconque*, isolante ou conductrice. Il se produit alors une détente de la vapeur qui suit une loi très particulière: la vapeur s'écoulant du réservoir où la pression est P dans une enceinte où règne la pression p , la pression dans la section étranglée ne s'abaisse pas au-dessous de la *pression critique* P_c , dont la valeur est une fraction de la pression P déterminée pour chaque état de la vapeur, notamment suivant son titre. Si la pression p est plus petite que la pression critique — ce qui est toujours le cas de mes expériences — la vapeur se détend, au delà de la section, de la pression critique à la pression p . La veine fluide est alors le siège de mouvements tourbillonnaires et on entend un son caractéristique.

La différence de potentiel prend alors de grandes valeurs, plusieurs milliers de volts. Cette tension, que l'on mesure entre la tuyère et un conducteur placé dans le jet, quand la vapeur s'échappe dans l'atmosphère, est encore proportionnelle à la pression d'admission. Mais si, la pression p étant constante, on augmente progressivement la pression d'admission P , la force électromotrice ne se produit qu'au moment où la pression p devient plus petite que la pression critique correspondant à la pression P . Il y a alors comme un « amorçage » de la tension qui monte très rapidement et *le rapport de la force électromotrice E à la différence de pression $(P-p)$ est constant*.

Il est remarquable que l'existence du phénomène électrique soit liée au passage de l'écoulement du fluide en régime turbulent, les vitesses étant alors supersoniques.

En même temps que la force électromotrice, j'ai évalué la puissance produite, d'une part en notant le temps de charge d'un condensateur de capacité connue, d'autre part, en faisant tourner un petit moteur électrostatique. J'ai constaté que la force électromotrice diminue avec la charge et il faut une plus grande pression pour obtenir la même tension en charge.

II. J'ai cherché les différents facteurs intervenant dans la production de la force électromotrice.

Il faut attribuer une grande influence aux conditions de l'écoulement de la vapeur dans un tube présentant une section étranglée et à l'existence d'une pression critique telle que la détente se fait en deux phases, de la pression P à la pression P_c (dans la section minimum) puis de la pression P_c à la pression p , avec une *discontinuité*, entre les deux, correspondant à un point d'inflexion de la courbe $V=f(p)$, représentant les variations de la vitesse en fonction de la pression d'échappement.

L'écoulement a une allure très spéciale du fait que la vapeur doit *nécessairement* contenir des gouttelettes liquides, la vapeur légèrement surchauffée ne donnant aucune électrisation.

L'eau de la chaudière contient des traces d'impuretés qui sont entraînées par primage. La composition du liquide affecte dans des proportions tout à fait remarquables la production de la force électromotrice, qui dépend à la fois de la *conductivité* de la solution et de son degré d'acidité *réelle* — (c'est-à-dire de la quantité d'ions H^+ réellement présent dans l'unité de volumes. La conductivité intervient pour la grandeur de la force électromotrice E : le rapport de E à la différence de pression $(P_c - p)$ reste constant mais il varie en sens inverse de la conductivité. L'acidité des solutions intervient pour la polarité : avec de l'eau seule le jet est généralement positif, l'introduction dans la vapeur de gouttelettes de composition connue, montre *qu'une solution acide donne un jet positif, une solution basique un jet négatif*, la tuyère étant toujours de polarité contraire.

La viscosité du liquide semble également intervenir et en interprétant les faits expérimentaux dans la théorie d'Hermholtz, on trouve une relation qui rend compte de la proportionnalité entre la force électromotrice E et la différence de pression $(P_c - p)$.

III. L'expérience m'ayant montré qu'une grille « polarisée » placée dans le jet, pouvait jouer le rôle d'*écran*, j'ai étudié l'effet d'une pareille grille dans un tube dans lequel on fait le vide et où s'échappe la vapeur.

Le tube est assez large pour ne pas gêner l'expansion du fluide. Il communique avec un condenseur, la pression absolue étant main-

tenue à environ 100 g./cm^2 . Son fonctionnement est tout à fait semblable à celui d'un tube contenant un gaz à basse pression à travers lequel on fait passer un courant en appliquant une différence de potentiel aux électrodes.

Si la grille est polarisée du même signe que les charges émises, on se rend compte qu'il est possible d'obtenir une transformation réversible et directe de la chaleur en énergie électrique.

En augmentant le nombre de jets on augmente proportionnellement la quantité d'électricité pouvant être débitée.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

L'Hydrogène lourd ; l'Eau lourde

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 8 Juillet 1935.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Ch. MAURAIN.

Vu
et Permis d'imprimer

Le Recteur de l'Académie de Paris,
S. CHARLÉTY.



Imprimerie H. WERCKLÉ, Paris
